

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Simona GRIGALIŪNIENĖ

SPAUDINIŲ ANT POPIERIAUS KAIP KOMPOZICINIŲ MEDŽIAGŲ SAVYBIŲ TYRIMAS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
MEDŽIAGŲ INŽINERIJA (08T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2015

Disertacija rengta 2011–2015 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

prof. dr. Donatas Jonas SIDARAVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, medžiagų inžinerija – 08T).

Konsultantas

prof. dr. Vytautas TURLA (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, mechanikos inžinerija – 09T).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Medžiagų inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

prof. habil. dr. Algirdas Vaclovas VALIULIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, medžiagų inžinerija – 08T).

Nariai:

dr. Valentin ANTONOVIČ (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, medžiagų inžinerija – 08T),

prof. habil. dr. Rimantas BELEVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, mechanikos inžinerija – 09T),

dr. Viktoras GRIGALIŪNAS (Kauno technologijos universitetas, medžiagų inžinerija – 08T),

dr. Kaspars KALNINŠ (Rygos technikos universitetas, medžiagų inžinerija – 08T).

Disertacija bus ginama viešame Medžiagų inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2015 m. lapkričio 27 d. 13 val.**

Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vgtu.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2015 m. spalio 26 d.

Disertaciją galima peržiūrėti VGTU talpykloje <http://dspace.vgtu.lt/> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos TECHNIKA 2345-M mokslo literatūros knyga

<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-457-856-4

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2015

© Simona Grigaliūnienė, 2015

simona.grigaliuniene@gmail.com

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Simona GRIGALIŪNIENĖ

INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF PAPER PRINTS AS COMPOSITE MATERIALS

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
MATERIALS ENGINEERING (08T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2015

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2011–2015.

Scientific supervisor

Prof. Dr Donatas Jonas SIDARAVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – 08T).

Consultant

Prof. Dr Vytautas TURLA (Vilnius Gediminas Technical University, Mechanical Engineering – 09T).

The Dissertation Defence Council of Scientific Field of Materials Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Prof. Dr Habil Algirdas Vaclovas VALIULIS (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – 08T).

Members:

Dr Valentin ANTONOVIČ (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – 08T),

Prof. Dr Habil Rimantas BELEVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Mechanical Engineering – 09T),

Dr Viktoras GRIGALIŪNAS (Kaunas University of Technology, Materials Engineering – 08T),

Dr Kaspars KALNINŠ (Riga Technical University, Materials Engineering – 08T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defence Council of Materials Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **1 p. m. on 27 November 2015**.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vgtu.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 26 October 2015.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at the VGTU repository <http://dspace.vgtu.lt/> and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

Reziumė

Disertacijoje nagrinėjamos įvairios struktūros spaudinių ant popieriaus kaip kompozicinių medžiagų mechaninės ir spalvinės savybės. Pagrindiniai tyrimo objektai – kompozicinių medžiagų, susidarančių dengiant dažų sluoksniu popierių įvairiais spaudos būdais, atsparumo, trinties bei spalvinės savybės, tamprumo rodikliai. Disertacijos tikslas – kompleksiškai ištirti spaudinių ant įvairių tipų popierių, gautų skirtingais spaudos būdais, pagrindines savybes ir nustatyti jų kaitos lyginant su atitinkamais popieriais dėsninumus.

Darbe sprendžiami šie pagrindiniai uždaviniai: spaudinių mechaninių ir spalvinių savybių eksperimentinis tyrimas, jų kaitos analizė bei popieriaus ir spaudinių tamprumo rodiklių identifikavimas taikant baigtinių elementų metodą bei sprendžiant atvirkštinį inžinierinį uždavinį.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai ir trys priedai.

Įvadiniamе skyriuje aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, formuluojamas darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė, ginamieji teiginiai, pateikiamos disertacijos tema autorės paskelbtos publikacijos ir pranešimai konferencijose bei darbo struktūra.

Pirmasis skyrius skirtas popieriaus ir spaudinių mechaninių ir spalvinių savybių literatūros analizei. Analizuojami spaudinių ant popieriaus kaip kompozicinių medžiagų susidarymo būdai bei tokių medžiagų savybių nustatymo metodika. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir tikslinami disertacijos uždaviniai. Antrajame skyriuje pateikta popieriaus ir spaudinių tyrimų metodologija bei naudotos medžiagos. Trečiajame skyriuje pateikiami ir analizuojami spaudinių ant įvairių popieriaus rūšių, gautų skirtingais spaudos būdais, mechaninių ir spalvinių savybių tyrimo rezultatai. Ištirtos spaudinių tamprumo, atsparumo tempimui ir lankstymui, trinties, spalvinės savybės bei nustatyti popieriaus ir spaudinių tamprumo moduliai, gauti sprendžiant atvirkštinį inžinerijos uždavinį ir, naudojant eksperimentiškai nustatytas spaudinių vibracines charakteristikas.

Disertacijos tema paskelbta 10 publikacijų: du straipsniai žurnaluose, įtrauktuose į Thomson ISI Web of Science duomenų bazę ir turinčiuose citavimo indeksą, vienas – konferencijų medžiagoje, referuotoje Thomson ISI duomenų bazėje, septynios publikacijos – kituose tarptautinių duomenų bazių leidiniuose. Disertacijos tema perskaityta 14 pranešimų Lietuvos bei kitų šalių konferencijose.

Abstract

Mechanical and colour properties of different structure prints on paper as composite materials are investigated in the present dissertation. The objects of the research are tensile strength, elastic, friction and colour properties of composite materials formed using different printing technologies. The aim of the thesis is to investigate comprehensively mentioned characteristics of prints made with different printing technologies on different papers and comparing print properties with paper characteristics to reveal the regularities of the properties changes during printing.

The objectives of the dissertation are: experimental investigation of prints mechanical and optical properties; analysis of the regularities of their change as compared with paper; identification of paper and prints elastic parameters using finite element method and inverse engineering problem concept.

The dissertation consists of four parts including introduction, 3 chapters, general conclusions, references, list of publications by the author on the topic of the dissertation and annexes.

The investigated problem is formulated, the relevance of the thesis is discussed and the object of the research is described in the introductory part. In addition, the aim and objectives, the defendend statements are formulated, the research methodology, scientific novelty and the practical significance of the results obtained are described. In Chapter 1 are reviewed publications on paper and prints mechanical and colour properties are reviewed in Chapter 1. Different printing technologies and formation of the composite materials in printing processes are discussed. Also, the investigation methods of composite materials are reviewed. On the basis of the published data conclusions on the work tasks are formulated. In Chapter 2 research methodology and used materials are described in detail. Data of investigation of the mechanical and colour properties of prints are presented in Chapter 3. Mechanical and colour characteristics of prints made with different printing technologies on papers having different structure (coated, uncoated, special ink jet) were investigated. Results of the identification of elastic properties are presented and discussed in 11 publications published on the subject of the dissertation: two articles – in the Thomson ISI Web of science journals having IF, one article – in conference proceedings referred in Thomson ISI data base, seven publications referred in other international data bases. 14 presentations on the subject of the dissertation were presented in national and international conferences.

Žymėjimai

Simboliai

L^* – šviesumas;
 a^* ir b^* – spalvingumo koordinatės;
 A – sugerties koeficientas;
 V – skysčio tūris;
 L – pėdsako ilgis;
 W – pėdsako plotis;
 F – tempimo jėga;
 u – pailgėjimas;
 l – bandinio ilgis;
 A – skerspjūvio plotas;
 E – Jungo modulis;
 ν – Puasono koeficientas;
 F – ieškomų kintamųjų tikslo funkcija;
 X – optimizavimo kintamieji;
 μ – trinties koeficientai.

Santrumpos

BEM – baigtinių elementų metodas;
GA – genetinis algoritmas;
NE – natūralus eksperimentas;
APDL – Ansys parametrinė programavimo kalba;

MD – išilginė popieriaus kryptis;
CD – skersinė popieriaus kryptis;
K – popieriaus dengimas vienu juodo „tonerio“ sluoksniu;
CMYK – popieriaus dengimas keturiais „tonerio“ sluoksniais;
STK – statinis trinties koeficientas;
KTK – kinetinis trinties koeficientas;
ECF – Elemental Chlorine Free;
PPS – Parker print surface.

Turinys

IVADAS.....	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas.....	3
Darbo tikslas.....	3
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas	4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai	5
Darbo rezultatų aprobavimas.....	5
Disertacijos struktūra.....	6
1. POPIERIAUS IR SPAUDINIŲ MECHANINIŲ IR SPALVINIŲ SAVYBIŲ ANALIZĖ 7	
1.1. Popierius ir spaudiniai kompozicinė medžiaga	7
1.2. Popieriaus ir spaudinių mechaninės ir spalvinės savybės.....	8
1.2.1. Spaudinių mechaninės ir spalvinės savybės.....	8
1.2.2. Popieriaus struktūra ir jos įtaka mechaninėms ir spalvinėms savybėms	9
1.2.3. Spaudinių gamybos ypatumai	13
1.2.4. Popieriaus trinties savybės	18
1.2.5. Kompozicinių medžiagų savybių nustatymo metodai	20
1.3. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	21

2. SPAUDINIŲ ANT POPIERIAUS TYRIMŲ METODOLOGIJA, NAUDOTOS MEDŽIAGOS.....	23
2.1. Tyrimams naudotos medžiagos	24
2.1.1. Popieriaus rūšių parinkimas	24
2.1.2. Spaudinių gamyba	24
2.2. Tyrimų metodika ir aparatūra	27
2.2.1. Spalvinių savybių matavimas	27
2.2.2. Sugerties matavimas	28
2.2.3. Paviršiaus šiurkštumo matavimas	30
2.2.4. Atsparumo lankstymui matavimas	30
2.2.5. Tempimo savybių matavimas	31
2.2.6. Trinties savybių matavimas	32
2.3. Popieriaus ir spaudinių tamprumo rodiklių identifikavimo technologija	34
2.4. Antrojo skyriaus išvados	39
SPAUDINIŲ MECHANINIŲ IR SPALVINIŲ SAVYBIŲ TYRIMAI	41
3.1. Spaudinių mechaninės ir spalvinės savybės	41
3.1.1. Spaudinių tamprumo savybės	42
3.1.2. Spaudinių atsparumas tempimui	53
3.1.3. Spaudinių atsparumas lankstymui.....	64
3.1.4. Spaudinių paviršiaus šiurkštumas	68
3.1.5. Spaudinių trinties savybės	71
3.1.6. Spaudinių spalvinės charakteristikos	83
3.2. Spaudinių mechaninių charakteristikų nustatymas.....	88
3.2.1. Atvirkštinis inžinerijos uždavinys.....	88
3.2.2. Spaudinių tamprumo moduliai.....	89
3.2.3. Spaudinių tikrinių virpesių dažnių nustatymo problema	92
3.3. Trečiojo skyriaus išvados	95
BENDROSIOS IŠVADOS	99
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	101
AUTORĖS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS.....	107
SUMMARY IN ENGLISH.....	109
PRIEDAI	123
A priedas. Popieriaus rūšys ir jų specifikacijos	124
B priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje	127
C priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos.....	139

¹Priedai pateikiami kompaktinėje plokštelėje

Contents

INTRODUCTION	1
Formulation of the problem	1
Relevance of the thesis	2
The object of research	3
The aim of the thesis	3
The objectives of the thesis	3
The research methodology	3
Scientific novelty of the thesis	4
Practical significance of the research findings	4
Defended statements	5
Approval of the research findings	5
The structure of the dissertation	6
1. ANALYSES OF PAPER AND PRINTS MECHANICAL AND COLOUR PROPERTIES	7
1.1 Paper and prints as composite materials	7
1.2. Mechanical and colour properties of paper and prints	8
1.2.1. Mechanical and colour properties of prints.....	8
1.2.2. Paper structure and its influence on mechanical and colour properties	9
1.2.3. Features of printing technologies.....	13
1.2.4. Friction properties of paper.....	18
1.2.5. Investigation methods of composite materials.....	20

1.2. Concluding remarks of Chapter 1 and gormulation of the objectives	21
2. RESEARCH METHODOLOGY OF THE PAPER AND PRINTS, USED MATERIALS	23
2.1. Materials used for experiments.....	24
2.1.1. Selection of paper grades	24
2.1.2. Production of the prints	24
2.2. Methodology of the research and equipment	27
2.2.1. Measurement of colour properties	28
2.2.2. Investigation of ink absorbtion	28
2.2.3. Measurement of surface rouhhness.....	30
2.2.4. Measurement of folding resistance	31
2.2.5. Measurement of tensil properties.....	31
2.2.6. Measurement of friction properties.....	34
2.3. Identification of paper and prints mechanical properties	34
2.4. Concluding remarks of Chapter 2.....	39
3. INVESTIGATION OF MECHANICAL AND COLOUR PROPERTIES OF PRINTS ..	41
3.1. Mechanical and colour properties of prints	41
3.1.1. Elastic properties of prints	42
3.1.2. Tensil strength of prints	53
3.1.3. Folding resistance of prints.....	64
3.1.4. Surface roughness of prints.....	68
3.1.5. Friction properties of prints	71
3.1.6. Colour properties of prints	83
3.2. Identification of prints mechanical characteristics	88
3.2.1. Inverse engineering objective	88
3.2.2. Elasticity modulus of prints	89
3.2.3. Identification problem of proper oscillation frequencies of prints.....	92
3.3. Concluding remarks of Chapter 3.....	95
GENERAL CONCLUSIONS	99
REFERENCES	101
LIST OF THE AUTHOR'S SCIENTIFIC PUBLICATIONS ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION	107
ANNEXES ¹	123
Annex A. Paper types and specifications	124
Annex B. Agreements of co-authors to provide published materials in the dissertation .	127
Annex C. Copies of scientific publication by the author on the topic of the dissertation ..	139

¹The annexes are supplied in the enclosed compact disc

Įvadas

Problemos formulavimas

Šiuolaikinės spaudos pramonės plėtrą diktuoja spausdintinių gaminių paklausa. Jeigu kai kurių spaudinių (periodinių) gamyba mažėja, tai kitų spaudinių spausdinama vis daugiau, atsiranda nauji gaminiai (Romano 2010). Vis didesnę vietą spaudos rinkoje užima reklaminė produkcija bei pakuotės, kurių yra didelė įvairovė. Šiems gaminiams keliami įvairūs reikalavimai, skiriasi jų konstrukcija bei dizainas. Tie reikalavimai yra labai įvairūs – mechaninis tvirtumas ir atsparumas įvairiems poveikiams, ilgaamžiškumas, prekinė išvaizda ir t. t. Daugelį reikalavimų įmanoma įvykdyti tik naudojant naujas, neretai kompozicines, medžiagas ir naujas spausdinimo technologijas.

Popieriui ir spaudiniams galima taikyti kompozicinės medžiagos sąvoką. Charakteringas kompozicinės medžiagos bruožas yra tas, kad joje yra pagrindinis komponentas – matrica, kuri lemia pamatines medžiagos savybes, kurios kryptingai keičiamos kitų komponentų. Tokia struktūra suteikia popieriui unikalias spausdinamąsias ir vartotojiškas savybes, kurias galima keisti labai plačiose ribose kaip keičiant matricos sudėtį bei struktūrą, taip ir užpildus bei kitus priedus. Spausdinimo proceso metu susidaro atspaudas – tai popierius, kurio paviršiaus dalis (priklausomai nuo spausdinamos informacijos) arba kai kada ir visas paviršius padengiama dažų sluoksniu. Susidarius tokiai kompozicinei medžiagai

pakinta popieriaus mechaninės, atsparumo, optinės ir kitos savybės, o duomenų apie spaudinių, ypač gautų šiuolaikiniais spaudos būdais ir su naujomis medžiagomis, atsparumo, optines ir kt. savybes yra labai mažai, o kai kurių charakteristikų išvis nėra ištirta. Kadangi šios lemia galutinių spaudos produktų vartotojiškas savybes jas būtina ištirti, nustatyti jų kaitos dėsningumus.

Darbo aktualumas

Pastaraisiais metais Lietuvoje stebimos daugiau nei perpus mažėjančios periodinių leidinių spausdinimo apimtys, tačiau Lietuvos spaustuvininkai randa naujų produktų ir rinkų. Vis didėja kartoninės pakuotės gamybos įmonių skaičius, įmonės investuoja į individualizuotos mažų tiražų spaudos galimybes, taiko skaitmeninės spaudos technologijas. Tokiu būdu, naujos veiklos sritys, nauji spausdintiniai gaminiai, pripažinimas užsienyje bei eksporto galimybės kelia Lietuvos spaustuvių konkurencingumą. Lietuvos spaustuvininkų asociacijos *LISPA* duomenimis, pernai spaustuvių produkcijos eksportas išaugo nuo 36% (2011 m.) iki 52% (2014 m.), taip pat matoma spausdintinės produkcijos poreikio didėjimo tendencija Lietuvoje. Spaudos pramonėje vis mažesnė dalis tenka tradicinių spaudinių gamybai – laikraščių, žurnalų spausdinimui. Tačiau statistika rodo, kad pernai didžiausią dalį sudarė dėžės, dėžutės, maišeliai, etiketės ir kiti pakuotės gaminiai (62%), o knygoms, periodinei produkcijai teko likusi spaustuvių gaminama produkcija (*LISPA* 2015).

Kalbant apie pakuotes, tampa aktuali ne tik išorinė pakuotės išvaizda, jos dizainas, bet labai svarbus yra jos patikimumas, atsparumas aplinkos ir kitų veiksnių poveikiui. Dažnai susiduriama ir su problemomis pakuojant, transportuojant ar net eksponuojant poligrafinę produkciją. Vertinant produkciją paprasta atsižvelgiama tik į spaudos proceso metu naudojamų medžiagų charakteristikas ir neįvertinama, kaip pasikeis gaminio atsparuminės ar kitos svarbios savybės padengus jį dažais tam tikru spaudos būdu. Negana to, netinkamas popieriaus ir spaudos būdo pasirinkimas gali apsunkinti spausdinimą ar padidinti broko kiekį spaudos proceso metu. Todėl tikslinga atlikti spaudos proceso metu susidarančių spaudinių kaip kompozicinių medžiagų atsparuminių, spalvinių savybių eksperimentinius tyrimus, ištirti, kaip kinta trinties savybės ne tik tarp popieriaus paviršių, tarp popieriaus ir spaudinio, tarp spaudinių. Be to, tokie sudėtingi objektai kaip spaudiniai gali būti modeliuojami skaitiniais metodais. Todėl aktualu įvertinti, kaip pakinta gaminio tamprumo rodikliai, taikant baigtinių elementų metodą ir atvirkštinio inžinerinio uždavinio sprendimo koncepciją.

Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas – spaudinių, kaip kompozicinių medžiagų, susidarančių dengiant įvairių tipų popieriaus paviršių dažų sluoksniu pagrindiniais spaudos būdais, atsparuminės, trinties, spalvinės savybės, tamprumo rodikliai.

Darbo tikslas

Kompleksiškai ištirti spaudinių, gautų skirtingais spaudos būdais ant įvairių tipų popierių, savybes ir nustatyti jų kaitos lyginant su atitinkamais popieriais dėsningumus.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti darbe reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Ištirti spaudinių, gautų skirtingais spaudos būdais ant įvairių tipų popierių, tamprumo savybes.
2. Ištirti spaudinių, gautų skirtingais spaudos būdais ant įvairių tipų popierių, atsparumo tempimui ir daugkartiniam lankstymui bei deformacinės savybės ir nustatyti jų kaitos dėsningumus.
3. Ištirti popieriaus ir spaudinių, gautų skirtingais spaudos būdais ant įvairių tipų popierių, trinties savybės ir nustatyti jų kaitos dėsningumus.
4. Ištirti spaudinių, gautų skirtingais spaudos būdais ant įvairių tipų popierių, spalvinės charakteristikas ir nustatyti jų kaitos dėsningumus.
5. Pritaikyti baiginių elementų metodą (BEM) popieriaus ir spaudinių modeliavimui ir nustatyti jų tamprumo rodiklius, taikant atvirkštinio inžinerinio uždavinio sprendimo koncepciją.

Tyrimų metodika

Disertacijoje taikomi analitiniai, skaitiniai ir eksperimentiniai tyrimo metodai. Darbe buvo tiriami spaudiniai, gauti ofsetiniu, fleksografiniu, rašaliniu ir lazeriniu spaudos būdais. Spaudos procesų metu keičiami dažų sluoksnio storiai, spaudos režimai, spalvingumas. Eksperimentams naudotos skirtingos rūšies, struktūros bei gramatūros popieriaus ir kartono rūšys. Spaudinių savybės ir struktūra buvo tiriamos, taikant šiuolaikinius tyrimo metodus: spalvinės savybės

tirtos spektrofotometriškai bei optiniu mikroskopu, statinės ir kinetinės trinties koeficientų reikšmės gautos horizontaliosios plokštumos trinties matavimo įrenginiu, atsparumas tempimui ir lenkimui tirtas tempimo įrenginiu Instron Electropulse E3000. Spaudinių tamprumo rodiklių nustatymui spręstas atvirkštinis inžinerinis uždavinys, taikant baigtinių elementų metodą ir genetinius algoritmus.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie medžiagų inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Eksperimentiškai nustatytos lazerinių, rašalinių, ofsetinių ir fleksografinių spaudinių mechaninės savybės ir nustatytos jų priklausomybės nuo popieriaus parametrų, dažų tipo ir sluoksnio storio.
2. Eksperimentiškai nustatytos spaudinių trinties savybės ir popieriaus bei dažų sąveikos įtaka joms. Nustatytos trinties koeficientų priklausomybės nuo slėgio tarp besitrinančių paviršių.
3. Eksperimentiškai nustatytos spaudinių spalvinės charakteristikos ir nustatyti jų kaitos dėsningumai priklausomai nuo sąveikos su popieriumi ypatybių.
4. Sprendžiant atvirkštinį inžinerinį uždavinį taikant baigtinių elementų metodą bei genetinius algoritmus ir remiantis eksperimentiniais virpesių tyrimo rezultatais nustatyti spaudinių tamprumo rodikliai.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Disertacijoje tirti spaudiniai, gauti naudojant skirtingos struktūros popieriaus rūšis bei spausdinant Lietuvoje plačiausiai naudojamais spaudos būdais, ir plačius tyrimo rezultatai gali būti panaudoti spaustuvėse projektuojant spaudinių gamybos technologinius procesus. Rezultatai taip pat gali būti panaudoti tobulinant pakuotes, kitus spaudos gaminius ir jų gamybos technologiją. Pritaikius darbe gautus rezultatus galima gauti glotnesnio paviršiaus, sustiprintos struktūros, atsparesnius trinčiai spaudinius. Skaitmeninio modeliavimo rezultatai (virpesių stabilizavimo režimai) gali būti panaudoti reguliuojant popieriaus juostos įtempimą daugiasekcininėse ritininės spaudos mašinose tarp atskirų spausdinimo sekcijų.

Ginamieji teiginiai

1. Ofsetinių, fleksografinių ir skaitmeninių (rašalinių ir lazerinių) spaudinių kaip kompozicinių medžiagų tampruminės, atsparumo tempimui bei daugkartiniam lankstymui savybės, spaudinių paviršiaus šiurkštumo ir spalvos parametrai priklauso nuo popieriaus tipo ir spausdinimo būdo.
2. Ofsetinių, fleksografinių ir skaitmeninių (rašalinių ir lazerinių) spaudinių kaip kompozicinių medžiagų trinties savybės priklauso nuo popieriaus tipo ir spausdinimo būdo – fleksografiniai ir rašalinės spaudos dažai didina trinties koeficientus, o ofsetiniai ir lazerinio spausdinimo – mažina.
3. Dėl adhezinės saveikos jėgų, ofsetinių, fleksografinių ir skaitmeninių (rašalinių ir lazerinių) spaudinių statinis ir kinetinis trinties koeficientai mažėja didėjant apkrovai.
4. Spaudinių modeliavimui siūlomas modifikuotas BE metodas, kuris kombinuojant su eksperimentiniais vibraciniais metodais ir naudojant genetinius algoritmus atvirkštinio inžinerinio uždavinio sprendimui, yra tinkamas nustatyti spaudinių tampruminius rodiklius.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema yra atspausdinta 10 publikacijų: dvi – mokslo žurnaluose, įtrauktuose į „ISI Web of Science“ duomenų bazę (Grigaliūnienė *et al.* 2014a), (Grigaliūnienė *et al.* 2015), viena – „ISI Proceedings“ leidinyje – (Grigaliūnienė *et al.* 2013a), septynios – kitų tarptautinių duomenų bazių leidiniuose (Markulytė *et al.* 2011), (Markulytė *et al.* 2012), (Grigaliūnienė *et al.* 2013b), (Ragauskas *et al.* 2013a), (Ragauskas *et al.* 2015), trys – kituose recenzuojamose mokslo leidiniuose (Grigaliūnienė *et al.* 2013c), (Grigaliūnienė *et al.* 2014b), (Grigaliūnienė *et al.* 2014c).

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti keturiolikoje mokslinių konferencijų Lietuvoje ir užsienyje:

- Jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“ 2012–2014 m. Vilniuje;
- Jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Tarpdalykiniai tyrimai fiziniuose ir technologijos moksluose“ 2014 m. Vilniuje;
- Respublikiniame Lietuvos skaičiuojamosios mechanikos seminare 2014 m. Vilniuje;

- Tarptautinėje mokslinėje – praktinėje konferencijoje „*Inovacijos leidybos, poligrafijos ir multimedijos technologijos*“ 2013–2014 m. Kaune;
- Tarptautinėje konferencijoje „*Mechanika*“ 2013–2014 m. Kaune;
- Tarptautinėje konferencijoje „*Mechatronic Systems and Materials*“ 2013 m. Vilniuje ir 2014 m. Opolėje (Lenkija);
- Tarptautinėje konferencijoje „*Vibroengineering*“ 2013 m., Druskininkuose;
- Tarptautiniame simpoziume „*PTS symposium innovative packaging*“ 2014 m., Miunchene (Vokietija);
- Tarptautinėje konferencijoje NIP30 „*Digital Printing/Digital Fabrication*“ 2014 m., Filadelfijoje (JAV);

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai ir bendrosios išvados. Taip pat yra 3 priedai. Darbo apimtis yra 140 puslapių, neskaitant priedų, tekste panaudotos 5 numeruotos formulės, 74 paveikslai ir 14 lentelių. Ruošiant disertaciją buvo panaudotas 91 literatūros šaltinis.

Popieriaus ir spaudinių mechaninių ir spalvinių savybių analizė

Spaudinys yra popierius, ant kurio yra vienas arba keli dažų sluoksniai, kurie dar neretai dengiami lako sluoksniu ar polimerine plėvele. Tokia struktūra yra charakteringa kompozicinėms medžiagoms. Spaudinių atveju jų savybės lemia pirmausia popierius. Todėl skyriuje apžvelgiamos popieriaus struktūra ir jo savybės. Detaliau analizuojamas atspaudos ant popieriaus kaip kompozicinės medžiagos susidarymo spausdinant procesas, apžvelgiami fleksografinės, ofsetinės bei skaitmeninės (rašalinės ir lazerinės) spaudos technologijos bei naudojamų dažų ypatumai, kurie įtakoja spaudinio mechanines ir spalvines savybes.

Skyriaus tematika paskelbtas vienas autorės straipsnis (Markulyte *et al.* 2012).

1.1. Popierius ir spaudiniai kompozicinė medžiaga

Kompozicinės medžiagos – tai medžiagos, sudarytos iš dviejų ar kelių komponentų, kurie skiriasi vienas nuo kito pagal struktūrą ar cheminę sudėtį, ir kuriuose šie komponentai sujungti į monolitinę struktūrą, turinčią tarp struktūrinių komponentų vienokias ar kitokias sandūros ribas. Tokioje dirbtinėje struktūroje gali

būti gaunamas optimalus fizinių, cheminių ir mechaninių savybių derinys, kuris skiriasi nuo individualių kompozicinę medžiagą sudarančių komponentų savybių (Valiulis 2005). Popierius, kurį sudaro celiuliozės plaušeliai, užpildai, klajinės medžiagos tūryje ar klijų sluoksnis ant paviršiaus, kreidiniai sluoksniai ir pan. atitinka kompozicinės medžiagos sampratą. Spaudiniai yra tik dar sudėtingesnė kompozicinė struktūra. Kompozicinės medžiagos gali būti labai įvairios. Jų atsiranda vis daugiau ir su ypatingomis savybėmis. Keletas tokių medžiagų gali rasti pritaikymą ir gaminant spaudos pramonės gaminius. Pavyzdžiui, yra sukurta lengviausia medžiaga pasaulyje – ji net 100 kartų lengvesnė už polistireną. Tyrėjams pavyko sukonstruoti darinį, kurio net 99,99% sudaro oras. Likusieji 0,01% – nanometrinio, mikrometrinio ir milimetrinio mastelio kietosios medžiagos (Schaedler *et al.* 2011). Viena iš naujausių medžiagų yra grafenas – panašios į grafitą struktūros tik vieno atomo storio medžiaga. Ši medžiaga pasižymi ypatingomis mechaninėmis (tvirtumu, kietumu bei lankstumu), elektrinėmis, optinėmis savybėmis. Iš grafeno pavyko sukurti ir nanostruktūrinius grafeno popieriaus pavyzdžius (Ranjbartoreh *et al.* 2011). Tokios formos grafenas atveria naujas naudojimo perspektyvas, tarp jų, elektronikos prietaisų gaminimą, naudojant spausdinimo technologijas.

Tačiau pagrindine medžiaga spaudiniams lieka popierius, kuris vis toliau tobulinamas, kuriamos naujos popierių ir kartonų rūšys, kurios yra tinkamesnės naujoms spausdinimo technologijoms, taip pat atveria naujas taikymo sritis.

1.2. Popieriaus ir spaudinių mechaninės ir spalvinės savybės

1.2.1. Spaudinių mechaninės ir spalvinės savybės

Spaudinių mechaninės savybės lemia galutinių spaudos gaminių daugelį svarbių savybių. Spaudinių mechaninės savybės yra svarbios taip pat spausdinimo (antra ir kitos spalvos spausdinamos jau ne ant popieriaus, o ant spaudinio) ir tolesnio atspaudų apdorojimo procesuose. Publikacijų analizė parodė, kad spaudinių mechaninės savybės praktiškai netirtos, išskyrus kelis epizodinius tyrimus. Pavyzdžiui, Forseth *et al.* (1997) tirdami drėgmės įtaką spaudos popieriaus paviršiaus šiurkštumui pateikė duomenis, kad spausdinant ofsetiniu būdu spaudinio paviršiaus šiurkštumas padidėja. Spaudinių tyrimų nebuvimas buvo dėl to, kad buvo manoma, kad plonas (1–3 μm) dažų sluoksnis praktiškai nekeičia storo (70–130 μm) popieriaus mechaninių charakteristikų. Turint omenyje, kad dažai ir nevandeniniai, tai ši prielaida beveik teisinga iškiliosios ir iš dalies ofsetinės spaudos spaudiniams. Plečiantis kokybiškai fleksografinei spaudai vandeniniais dažais

(Flexography 2001, Kipphan 2002), vis daugiau naudojant rašalinę spaudą daugiausiai vandeniniu rašalu (Kipphan 2002, Johansson *et al.* 2007) ši prielaida, kad dažai nekeičia popieriaus mechaninių savybių, reikalauja atskiro išsamaus kompleksinio tyrimo. Lazerinėje (elektrofotografinėje) spaudoje (Sidaravičius ir Montrimas 2005) dažų sluoksnis yra daug storesnis, iki 10–15 μm , ir jo įtaka spaudinių mechaninėms savybėms turi būti didesnė.

Spaudinių spalvinės charakteristikos dažniausiai yra nagrinėtos kaip spausdinimo kokybės parametras, ypatingai tiriant rastrinių taškielių padidėjimą spausdinant dėl slėgio ir dėl dažų įsiskverbimo į popierių (Kipphan 2002, Johansson *et al.* 2007, Раскин *et al.* 1989). Dažų įsiskverbimas į popierių ypač svarbus kokybiškoje rašalinėje spaudoje (pavyzdžiui, Lamminmäki *et al.* 2010, Heilmann *et al.* 1998), dėl ko rašalinei spaudai yra sukurti specialūs popieriai.

1.2.2. Popieriaus struktūra ir jos įtaka mechaninėms ir spalvinėms savybėms

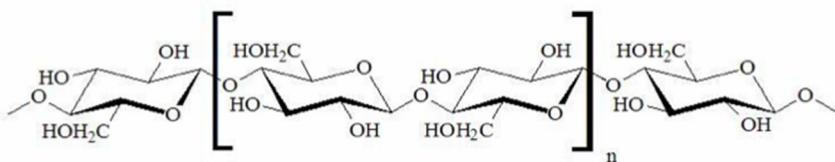
Skirtingai nuo spaudinių popieriaus, kuris yra spaudinių pamatinis komponentas, mechaninės savybės ištirtos plačiai ir išsamiai aprašytos.

Popieriui ir kartonui (kuris yra taip pat popierius, tik storesnis), naudojamiems spaudiniams yra keliama įvairūs reikalavimai jų mechaninėms charakteristikoms, priklausomai nuo tolesnio apdorojimo procesų ir spaudos produkto rūšies. Spausdinant popierius yra tempiamas bei spaudžiamas ir turi atlaikyti šias apkrovas, o jo deformacija tiesiogiai veikia spausdinimo kokybę. Lankstymo, kirtimo, pjovimo, blintinio ar kongrevinio įspaudimo bei kituose darbuose, kurių metu suformuojami, pavyzdžiui, puodeliai, dėžutės ir kt., medžiagai tenka atlaikyti įvairias apkrovas visomis kryptimis, kurios sukelia įvairias deformacijas – tiesinę ir netiesinę tampriąją, plastinę. Kai kuriais atvejais plastinė deformacija yra reikalinga, tačiau dažnai su ja atsirandantys gaminių pažeidimai yra nepageidautini. Norint išvengti šių nepageidautinų reiškinių, būtina žinoti naudojamo popieriaus ar kartono struktūros ypatumus, kurie įtakoja ir spausdinimo procesą, ir būsimojo gaminio mechanines ir spalvines savybes. Popieriaus mechaninės ir optinės savybės aprašytos daugelyje publikacijų ir apibendrintos monografijose (*Paper Physics* ed. Niskannen 2008, Johansson *et al.* 2007, Thompson 2004, *Handbook of Paper and Board* ed. Holik 2013).

Popierius – plonalakštė medžiaga sudaryta iš susipynusių augalinių plaušelių, susijusių paviršiaus ryšiais. Tai poringas, turintis daug kapiliarų kūnas, į kurį gali patekti oro, drėgmės ir poligrafinių dažų, arba savotiškas karkasas, sudarytas iš celiuliozės plaušelių, stipriai tarpusavyje sujungtų vandenilinėmis jungtimis ir iš dalies mechanškai (Thompson 2004, Berezinas 1990, Kipphan 2002). Celiuliozės karkasas suteikia gaminiui formą, suriša užpildo komponentus, tolygiai tūryje paskirsto veikiančias apkrovas. Popierius gaminamas iš medienos

plaušienos arba iš grynios celiuliozės. Medienos plaušienos sudėtis: celiuliozė, ligninas, hemiceliuliozė ir ekstraktinės masės. Ji suriša į popieriaus sudėtį įeinančias medžiagas. Grynios celiuliozės popieriaus sudėtyje nėra lignino ir sumažintas hemiceliuliozės kiekis. Be to, popieriuje dažniausiai yra klajinių medžiagų, paprastai krakmolo, kurios padidina popieriaus atsparumą drėgmės poveikiui. Klajai gali būti visame tūryje arba dengia tik popieriaus paviršių.

Celiuliozės plaušeliai atitinka daugybę reikalavimų, kurie yra keliami popieriaus gamybai. Didžiausi celiuliozės (1.1 pav.), kurios pagrindą sudaro pasikartojantys sacharidų fragmentai, plaušelių privalumai yra didelis mechaninis stiprumas, plastiškumas, atsparumas plastinei deformacijai, atsparumas vandeniui, hidrofiliškumas ir kt. (Yoon 2007, Niskannen 2008). Celiuliozės molekulės sudaro skaidulas ir iš jų susiformuoja plaušeliai.



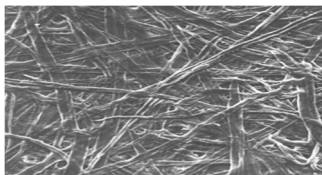
1.1 pav. Celiuliozės struktūra (Yoon 2007)

Fig. 1.1. Structure of cellulose

Celiuliozės plaušelių savybės priklauso nuo medienos rūšies. Minkštos medienos plaušeliai yra ilgesni, pasižymi didesniu sulipimu bei didesniu stiprumu lyginant su kietos medienos plaušeliais (Moore 2008). Tačiau kietos medienos plaušeliai pasižymi didesniu paviršiaus lygumu, kadangi plaušeliai yra trumpesni ir yra siauresnis plaušelių ilgių pasiskirstymas (Azimi *et al.* 2008). Plaušienos dalelės tarpusavyje sujungtos fizikinėmis vandenilinėmis jungtimis (Thompson 2004). Popieriaus medžiagoje šiomis jungtimis sujungti plaušeliai sudaro tinklą, kuris iš išorės veikiamas apkrovas per ryšius tarp plaušelių perduoda atskiroms plaušeliams (Nazad *et al.* 2000, Borch *et al.* 2002). Priklausomai nuo popieriaus gaminimo (liejimo) režimų gaunamos skirtingos šio tinklo struktūros, kurios lemia popieriaus mechanines ir optines savybes (Bernard 2005).

Popieriaus sudėtinės dalys ir jų išsidėstymas struktūroje yra labai svarbios, kadangi jos lemia beveik visas fizikines popieriaus savybes. Pavyzdžiui, popieriaus tvirtumas priklauso nuo plaušelių išsidėstymo ir sukibimo tarpusavyje. Paviršiaus šiurkštumas ir tūris priklauso nuo paviršiaus poringumo bei plaušelių ir kitų sudedamųjų dalių kiekio struktūroje. Plaušelių išsidėstymas tarpusavyje turi įtakos labai svarbioms popieriaus optinėms savybėms (Niskannen and Pakarinen 2008), kurios lemia spaudinyje esančios informacijos suvokimą bei spaudinio prekinę išvaizdą ir pan. Be fizikinių savybių, tiesiogiai nuo plaušelių struktūros priklauso popieriaus morfologija (1.2 pav.). Erdvinis plaušelių išsidėstymas

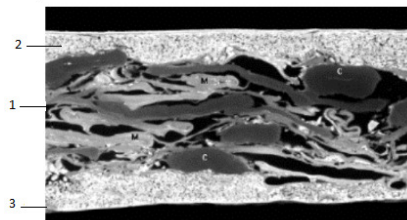
struktūroje yra stochastinis ir dažnai nepastovus. Tuo tarpu kitos popieriaus sudėtinės dalys bei cheminiai komponentai yra prisitvirtinę prie plaušelių taip pat tam tikru atsitiktiniu būdu. Visa tai įtakoja popieriaus ir dažų sąveiką, kuomet susidaro nauja struktūra. Be to, popieriaus struktūra yra jautri drėgmės poveikiui (Forseth et al. 1997).



1.2 pav. Mikroskopinis popieriaus paviršiaus vaizdas
(*Paper Physics* ed. Niskannen 2008)

Fig. 1.2. Microscopic image of paper surface

Popieriaus struktūra nėra vienalytė. Pirmiausiai skiriasi išoriniai ir vidiniai popieriaus sluoksniai. Priklausomai nuo kalandravimo režimų išoriniai sluoksniai gali būti puresni (silpnai kalandruotas popierius) arba tankesni (superkalandruotas popierius). Tokie vidinės struktūros skirtumai keičia popieriaus mechanines, fizines ir fizines chemines savybes. Kartu keičiasi ir spaudinių atitinkamos savybės. Dar didesnę įtaką turi popieriaus dengimas kreidiniu sluoksniu (1.3 pav.), nes šio sluoksnio savybės iš esmės skiriasi nuo pagrindinių popieriaus sluoksnių savybių.



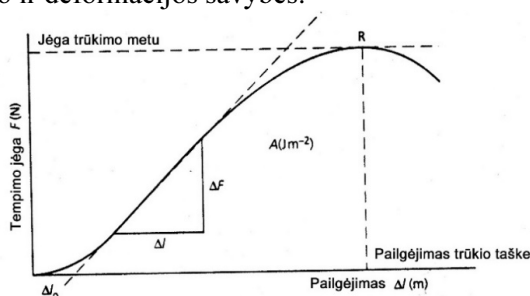
1.3. pav. Kreidinio popieriaus struktūra: 1 – pagrindas,
2, 3 – kreidiniai sluoksniai

Fig. 1.3. Structure of the coated paper: 1 – base paper,
2, 3 – pigment layer

Kreidinio popieriaus savybes taip pat reiktų nagrinėti kaip kompozitinės medžiagos. Šiuo atveju matrica – komponentas, kuris yra vientisas visame kompozicinės medžiagos tūryje – yra plaušiena. Ji suteikia gaminiui formą, suriša užpildo komponentus, tolygiai tūryje paskirsto veikiančias apkrovas.

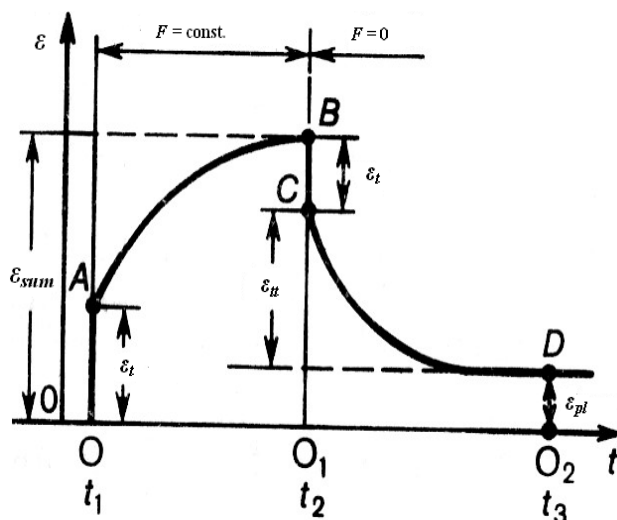
Popieriaus kreidavimas yra svarbus procesas, naudojamas pagerinti popieriaus išorę ir spausdinamąsias savybes (Morsy 2004). Kreidavimas sumažina dažų absorbciją į popieriaus pagrindą, padidina popieriaus baltumą, paviršiaus lygumą (Pauler 2002). Kreidinio popieriaus atsparumo savybės ženkliai skiriasi nuo įprastinio nekredinio. Kreidinio sluoksnio mechaninių savybių priklausomybės nuo kreidavimo pigmento rūšies, jo morfologijos, nuo rišklio savybių bei pigmento ir rišklio santykio nagrinėja Morsy 2004. Popieriaus kreidavimo masės sudėties įtaka popieriaus/kartono savybėms – lygumui, šiurkštumui, blizgumui, baltumui, o taip pat spaudos kokybei, analizuojama Schuman *et al.* 2005a publikacijoje. Kreidinis sluoksnis daro įtaką popieriaus paviršiaus nelygumui bei dažų įgeriamumui (Hallback *et al.* 2006). Kreidinio sluoksnio sudėties ir dengimo būdo priklausomybė kreidinio sluoksnio atsilupimui yra nagrinėjama Kuusipalo 2000, kreidinio sluoksnio sudėties įtaka spausdinamosioms savybėms – Schuman *et al.* 2005a, Schuman *et al.* 2005b, Kumar *et al.* 2011, Morsy *et al.* 2004 ir kt. darbuose. Kreidinio sluoksnio įtaka stebima atskirai analizuojant popieriaus mechanines bei spalvines savybes.

Celiuliozės molekulių, iš jų susidariusių skaidulų ir plaušelių bei popieriaus struktūra lemia popieriaus elastines ir deformacines savybes. Popieriuje stebima tamprioji, tūsaus tamprumo (netiesinė tamprioji) ir plastinė deformacijos (Thompson 2004). Pirmosios yra grįžtamosios, o plastinė atsiranda tik esant pakankamai didelei apkrovai. Popieriaus deformacija tempiant yra netiesinė, ir tamprumo modulis yra nustatomas pagal sąlyginai tiesinę deformacijos priklausomybės nuo įtempio dalį (1.4 pav.). Be to, popieriaus deformacija vystosi gana lėtai (1.5 pav.) (Шахкельдян, Б. Н. и Загаринская, Л. А. 1998). Į šiuos popieriaus deformacijos ypatumus būtina atsižvelgti nustatant popieriaus (taip pat ir spaudinių) tamprumo ir deformacijos savybes.



1.4 pav. Popieriaus deformacijos tempiant priklausomybė nuo įtempio

Fig.1.4. The dependence of paper strain one tensile force



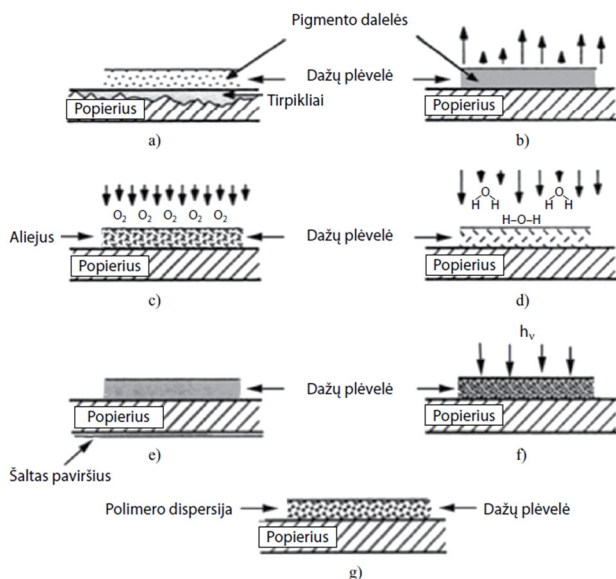
1.5 pav. Popieriaus deformacija esant pastoviai įtempčiai: ε_t – tamprioji, ε_{tt} – netiesinė tamprioji (tąsaus tamprumo), ε_{pl} – plastinė, ε_{sum} – suminė (Thompson 2004).

Fig 1.5. Paper's deformation at constant tensile force: ε_t – elastic, ε_{tt} – nonlinear elastic, ε_{pl} – plastic, ε_{sum} – total

1.2.3. Spaudinių gamybos ypatumai

Spaudinys – tai popierius, kurio paviršiaus dalis (priklausomai nuo spausdinamos informacijos) arba kai kada ir visas paviršius padengiama dažų sluoksniu. Todėl spaudinys laikytinas kompozicine medžiaga. Jis gaunamas spausdinant, kai dažai prispaudžiami prie popieriaus esant didesniai arba mažesnei slėgiui. Vyksta dažų sąveika su popieriumi – dažai prilimpa prie paviršiaus ir iš dalies įsiskverbia į popieriaus tūrį. Dažai užsitvirtindami (džiūdami) sudaro stiprią plėvelę. Priklausomai nuo spaudinių paskirties, spausdinimo būdo ir kitų technologinio proceso faktorių dažai užtvirtinami įvairiais būdais – tirpiklio išgarinimu, rišiklio arba jo tirpiklio įsigėrimu į popierių, chemine oksidacija, fotocheminiu susiuvimu, išlydant ir vėl atšaldant (1.6 pav.).

Susidariusios dažų ištisinės arba dalinės plėvelės keičia popieriaus mechanines, spalvines ir kt. savybes. Tinkamas popieriaus ir dažų parinkimas leidžia gauti reikiamos struktūros spaudinius su pageidautinomis savybėmis. Čia pasirinkimas yra labai didelis, tačiau galima išskirti pagrindinius vyraujančius spaudos būdus, kuriais spausdinama didžiausia spaudos produkcijos dalis.



1.6 pav. Dažų plėvelės susidarymo ant popieriaus būdai: a) tirpiklių įsigėrimu (absorbcija), b) tirpiklių išgarinimu, c) oksidacine polimerizacija, d) drėgmės poveikiu, e) išlydimu – atšaldymu, f) radiacine polimerizacija, g) dalies tirpiklio išgarinimu iš dispersinių dažų

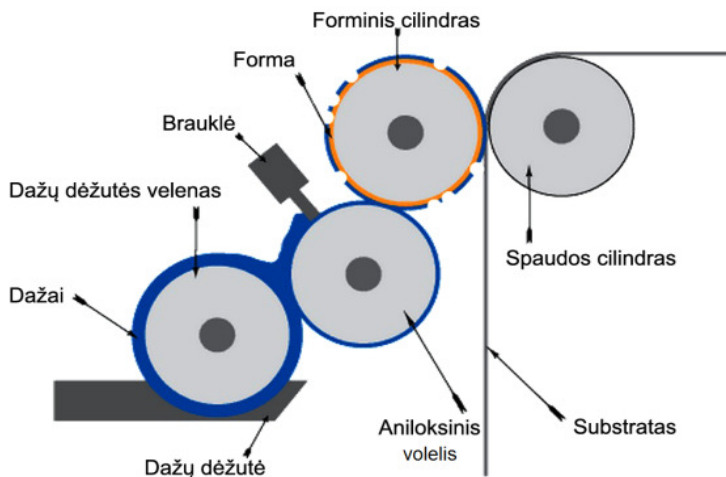
Fig. 1.6. The formation of the ink film on paper: a) solvent penetration (absorbtion), b) solvent evaporation, c) oxidative polymerization, d) humidity affect, e) fusing and freezing, f) radiative polymerization, g) removal of the solvent from dispersive ink

Spausdinimo technologijos. Komercinio spausdinimo pramonėje buvo sukurta nemažai spausdinimo mašinų, kurios naudoja skirtingas spausdinimo technikas. Spausdinimo pramonę galima būtų suskirstyti į šešias pagrindines spausdinimo technologijas: plokščioji ofsetinė (trumpinama – ofsetas), iškilioji spauda, šilkografija, fleksografija, giliaspaudė ir skaitmeninė spauda (Kipphan 2002, Chen 2009). Kiti mažiau populiarūs, bet naudojami spaudos tipai yra elektrostatinė, giliaspaudė, termografija. Neskaitant ofsetinės spaudos, skaitmeninė spauda yra viena iš populiariausių ir efektyviausių spaudos technologijų. Taip pat ji, lyginant su ofsetu, nereikalauja didelio tiražo tam, kad būtų rentabili (Azadi 2007). Skaitmeninei spaudai nereikalinga fotoformų ar spausdinimo formų gamyba, galima spausdinti tiesiai iš kompiuterio, taip sumažinant sąnaudas. Efektyviausi skaitmeninės spausdinimo technologijos būdai yra rašalinė ir lazerinė spauda.

Plokščioji ofsetinė spauda. Tai viena labiausiai paplitusių spausdinimo technologijų. Ja galima spausdinti beveik visą įmanomą spaudos produkciją, ypač tinka aukštos kokybės spaudiniams. Šioje technologijoje naudojami palyginus tiršti dažai, kurių rišiklis yra aliejinės (oleofilinės) prigimtys. Tai lemia, kad tokie dažai neardo popieriaus struktūros, nors gali priklausomai nuo popieriaus įsiskverbti į jo tūrį.

Lazerinė (elektrofotografinė) spauda. Pastarąjį dešimtmetį lazerinė spauda išgyveno plataus masto transformaciją. Ženklūs pakitimai įvyko keturiuose pagrindinėse srityse – kainoje, patikimume, naudojamose medžiagose ir, žinoma, spaudinio kokybėje (Azin *et al.* 2014, Meyer 1990). Šiai spausdinimo technologijai dažnai būtina naudoti popierius su specialiomis savybėmis – jie turi būti šiek tiek laidūs elektrai. Naudojami sausi dažai („toneriai“), kurie fiksuojami ant popieriaus juos išlydant, kas lemia sąveikos su popieriumi ypatumus. Dažų sluoksnis atspaudė yra didesnis palyginus su ofsetine spauda.

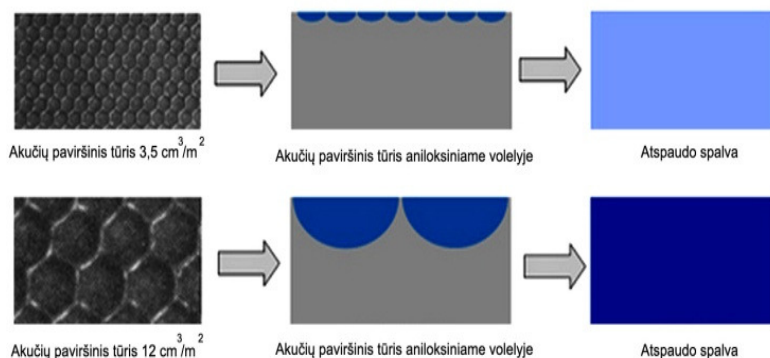
Fleksografinė spauda. Fleksografijos spaudos technologija yra tinkama spausdinti ant kreidinio, nekreidinio popieriaus, metalizuotų paviršių, plastikinių plėvelių, labiausiai naudojama pakuočių gamyboje. Fleksografinis spausdinimo būdas yra ne tik efektyvus, atitinka kokybės reikalavimus, bet ir rentabilus (Rentzhog 2004). Fleksografinės spaudos spausdinimo principas (1.7 pav.) yra paprastas (Foundation of Flexographic Technical Association 1999).



1.7 pav. Fleksografinės spaudos spausdinimo principas
(Foundation of Flexographic Technical Association, 1999)

Fig. 1.7. Flexographic printing process

Naudojamos elastingos spausdinimo formos ir mažo klampumo, greitai džiūstantys spiritiniai, vandeniniai ar UV dažai. Ant spausdinimo formos dažai užtepami aniloksinio (rastrinio) voleliu (1.8 pav.) (Foundation of Flexographic Technical Association 1999). Aniloksinis volelis sukasi dažų vonelėje, brauklė nuima dažų perteklių, o likę dažai užtepami ant spausdinimo formos, o nuo spausdinimo formos – ant spausdinamos medžiagos. Fleksografijoje naudojami skysti dažniausiai vandeniniai dažai, rečiau tirpikliniai. Jie turi būti skysti, kad dažų perdavimo sistema galėtų išlaikyti ir greitai perkelti reikiamą dažų kiekį ant spausdinimo formos.



1.8 pav. Aniloksinio volelio paviršius ir akutės su dažais
(Foundation of Flexographic Technical Association, 1999)

Fig. 1.8. Anilox roller surface, cells and ink

Vandeniniai dažai paplito, kai buvo pradėta daugiau dėmesio skirti aplinkosaugai. Tokiais dažais atspausdinti spaudiniai gali būti džiovinami šiltu oru arba infraraudonaisiais spinduliais (Spring 1996). Spausdinant ant popieriaus ir kitų poringų medžiagų susiduriama su dažų įsigėrimu į spausdinamosios medžiagos tūrį ir galimu vandens poveikiu į popieriaus struktūrą. Vanduo skverbiasi į popieriaus struktūrą ir ją apardo, atlaisvindamas suspaustus celiuliozės plaušėlius, mažindamas kohezinę jų sąveiką, didindamas popieriaus poringumą (Ketoja 2008). Vandens poveikis priklauso nuo vandens kiekio, kontakto laiko, popieriaus pradinės struktūros (Forset *et al.* 1997). Jeigu ofsetinėje spaudoje kontaktuojančio su popieriumi vandens kiekis yra palyginus nedidelis ir vandens poveikis yra nedidelis – šiurkštumas padidėja 12–13% (Forset *et al.* 1997), tai fleksografinėje ir rašalinėje spaudoje naudojamuose vandeniniuose dažuose yra iki 50% vandens ir galima laukti daug žymesnio poveikio. Reikia pažymėti, kad ir spiritiniuose dažuose visada yra tam tikras kiekis vandens, kuris gali sąveikauti su popieriumi ir keisti jo struktūrą bei savybes.

Rašalinė spauda ir dažai. Rašalinio spausdinimo technologija remiasi atskirų rašalo lašelių formavimu ir jų nusodinimu reikiamoje spaudinio vietoje (Kipphan 2002). Rašalinio spausdinimo procesas yra sudėtingas ir reikalauja subtilaus cheminių ir fizikinių rašalo savybių parinkimo, kurios tiesiogiai susiję su spaudinio stabilumu, spausdinimo kokybe, spalvų valdymu, vilgymu ir sukibimu su spausdinamąja medžiaga.

Rašalas yra viena iš pagrindinių kliūčių, trukdančių rašaliniam spausdinimui įsiskverbti į kai kurias rinkas, keliančias specifinius reikalavimus. Pavyzdžiui, rašalas turi nekenkti žmogaus sveikatai, būti tinkamas liestis su maisto produktais, neturėti kvapo, pasižymėti maža monomerų ir kitų komponentų migracija, būti pakankamai atsparus trinčiai pakavimo ir platinimo procesuose, o spaudiniai turi būti tinkami lankstymui, iškirtimui, šildymui (Castrejón-Pita *et al.* 2013). Šiuo metu naudojamos keturios pagrindinės rašalinių dažų rūšys: vandeniniai, tirpikliniai, fazę keičiantys ir reaktyvūs – kietėjantys UV spinduliuose. Rinkoje galima rasti daugiau rašalo rūšių (pvz., aliejiniai, lateksiniai arba skysti). Taip pat egzistuoja hibridinės keturių pagrindinių rašalų tipų versijos, pavyzdžiui, vandens pagrindu pagaminti dažai, kurių sudėtyje yra tam tikras tirpiklio kiekis arba tirpiklinis UV rašalas (*Mimaki SUV ink*, Hudd 2010). Plačiausiai yra naudojamas vandeninis rašalas ir tai lemia, kad kokybiškam spausdinimui reikalingas specialus popierius, kurio neveikia rašale esantis vanduo. Spausdinant ant kitų rūšių popierių susiduriama su nepageidautina rašalo sąveika su spausdinamąja medžiaga, ir pirmiausiai su spausdinamųjų elementų išplitimu ir rašalo įsigėrimu į popierių.

Papildomi reikalavimai spaudiniams. Šiuolaikiniams spaudiniams yra keliami įvairūs papildomi reikalavimai, naudojamos papildomos dangos, kurios pakeičia gaminio prekinę išvaizdą, o kartu ir kitas spaudinio savybes. Tai lakavimas dispersiniais, UV ar elektronų spinduliu suketinamais lakais. Geresnei atspausdintos informacijos apsaugai nuo išorinių poveikių spaudiniai yra padengiami plėvele – laminuojami. Padengus atspaudą su popieriumi viena iš šių dangų, gaunama trikomponentė kompozicinė medžiaga.

Lyginant su popieriumi, spaudiniuose keičiasi šios svarbios spaudinių fizinės ir kitos savybės: tvirtumas, paviršiaus šiurkštumas, trintis, poringumas, optinės savybės – spalva, blizgumas ir kt. Tie pokyčiai gali labai skirtis priklausomai nuo spausdinimo būdo, nes skiriasi ne tik dažų savybės, bet ir dažų sluoksnio storis ir jo sankyba su popieriumi.

Lakavimas yra vienas iš plačiai naudojamų spaudinių apdailos procesų. Šiuolaikinėse spausdinimo mašinose dažnai yra papildomos lako sekcijos. Žvelgiant iš šalies – lakas yra nematoma spaudinio dalis. Jis yra skaidrus ir permatomas. Bet iš tikrųjų, ar tai būtų ofsetinis lakas, ar dispersinis lakas, ar UV greito džiūvimo – jis spaudiniui suteikia naujų savybių. Pavyzdžiui, minėtos lakų rūšys keičia paviršiaus blizgumą. Jie būna matiniai, blizgūs ir labai blizgūs. UV lakas

išsiskiria privalumų gausa – įvairūs blizgesio efektai, dalinis lakavimas, perlautrinis lakavimas, metalizuotas lakas, lakas su pageidaujamu kvapu, atsparumas temperatūros pokyčiams, atsparumas išblukimui, sukuriamas erdvinis 3D vaizdas. Tačiau po spaudinio lakavimo keičiasi ne tik jo paviršiaus savybės, bet ir anksčiau minėtos fizikinės savybės. Lakuoti atspaudai pasižymi didesniu mechaniniu stiprumu bei atsparumu drėgmei ir paviršiniais pažeidimams. Tai susilaukia tyrėjų dėmesio, pavyzdžiui, popieriaus bei atspaudų, lakuotų UV laku, blizgumas ir šiurkštumas buvo tirtas Karlovičiaus ir Novakovičiaus (Karlovic and Novakovic 2010). Buvo nustatyta, kad didėjant UV lako kiekiui ant atspaudų, didėja blizgumas, tačiau šiurkštumo reikšmės mažėja.

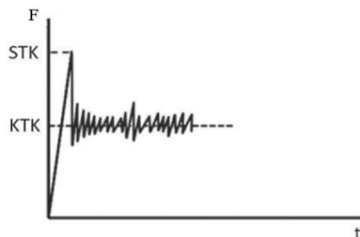
1.2.4. Popieriaus trinties savybės

Reikalavimai skiriasi trinčiai, kai kalbama apie popierių. Didelis kinetinės trinties koeficientas pageidaujamas formuojant ritinį ir tolimesniame jo apdorojimo procese. Taip pat tai svarbu išoriniam ritinių stabdymo procesui spausdinimo ceche. Didelis statinės trinties koeficientas reikalingas popieriaus ritinių pakėlimo procese, kad jie neišsivyniotų ir pan. (Borch *et al.* 2002).

Trintis yra svarbi ne tik popieriaus gamybos procesuose, bet ir gaminams iš jo (Garoff *et al.* 2002, Back 1991). Kaip pavyzdys didelė trintis yra reikalinga tarp pakavimo maišelių ar dėžučių, supakuotų į gofro kartono dėžes transportavimo ar sandėliavimo metu (Singleton *et al.* 1997). Trintis lemia kai kuriuos spausdinimo mašinų darbo trikdžius paduodant popierių iš rietuvės ir transportuojant jį per sekcijas. Šie parametrai taip pat yra svarbūs spausdintuvuose, kuriuose popierius ar spaudiniai paduodami frikciniais mechanizmais. Dažna problema, su kuria susiduriama popieriaus padavimo sekcijoje – dviejų lapų, ypač kreidinio popieriaus, padavimas. Tai aktualu, kadangi kreidinis popieriaus vis daugiau naudojamas dėl aukštos spaudinių kokybės (Enomae *et al.* 2006, Borch 1993).

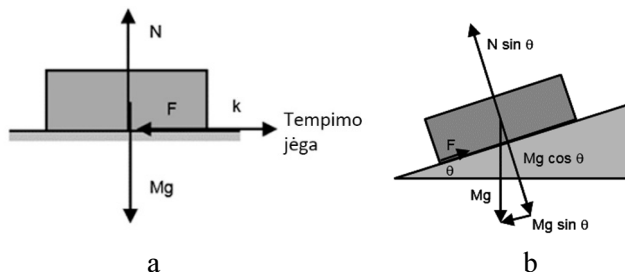
Trintis tarp popierių bei spaudinių vertinama matuojant statinį ir kinetinį trinties koeficientus. Įprastai statinio trinties koeficiento reikšmė yra žymiai didesnė nei kinetinio (1.9 pav.).

Statinis trinties koeficientas matuojamas pradiname didžiausios trinties jėgos taške ir yra funkcija jėgos, būtinos siekiant nugalėti trinties jėgą ir pradėti judėjimą. Kinetinis trinties koeficientas yra vidutinė apkrovos vertė, matuojama per nustatytą laiką arba poslinkį (Garoff 2002). Trinties savybėms matuoti yra naudojami horizontalios arba nuožulnios plokštumos matavimo įrenginiai (1.10 pav.).



1.9 pav. Trinties jėgos tarp dviejų kietų kūnų priklausomybė nuo laiko (Garoff 2002)

Fig. 1.9. The time dependence of friction force between two metal bodies



1.10 pav. Trinties matavimo įrenginių schemas: a) horizontalios plokštumos, b) nuožulnios plokštumos. M – kūno masė, g – gravitacijos konstanta, N – vertikaliąjį jėga, k – standumo koeficientas, θ – pasvirimo kampas (Garoff 2002)

Fig. 1.10. Devices for friction measurement: a) horizontal plane, b) vertical plane. M – body mass, g – gravity constant, N – normal force, k – stiffness constant, θ – plane angle

Horizontalios plokštumos įrenginiuose (1.10 pav., a) vienas kietas kūnas yra dedamas ant kito kieto kūno horizontalioje plokštumoje, ir jėga, reikalinga inicijuoti arba palaikyti horizontaliam judesiui, yra įrašoma. Ši jėga gali būti tempimo arba stūmimo. Nuožulnios plokštumos trinties matavimo įrenginiai (1.10 pav., b) yra primityvesni. Jų veikimas pagrįstas plokštumos kampo nustatymu, kuriam esant kietas kūnas, padėtas ant nuožulnios plokštumos, pradeda slysti, lėtai didinant plokštumos pakėlimo kampą. Šiuo metodu gali būti nustatomas tik statinis trinties koeficientas (Garoff 2002).

Popieriaus į popierių ir popieriaus į metalą trintis tirta eilėje darbų, kurie apibendrinti (Borch *et al.* 2002, Niskannen 2008). Nors pilnai popieriaus trinties savybių apibūdinimui reikėtų tirti statinį ir kinetinį trinties koeficientus (T 549

om-01, LST ISO 8295, ASTM D-1894-75), dažniausiai tirtos statinio trinties koeficiento priklausomybės nuo popieriaus sudėties, jo paviršiaus apdorojimo, popieriaus šiurkštumo ir pan. Dauguma tyrimų atlikta su nekreidiniu popieriumi. Nustatyta, jog popieriaus minkštinimas ir balinimas nekeičia popieriaus trinties savybių, pasikeičia tik paviršiaus energija (Bäckström *et al.* 1999). Kai kuriuose tyrimuose nustatyta, jog trintis sumažėja didėjant LLC (mažos molekulinės masės lipofiliniams komponentams, sočiosioms rūgštims, sotiesiems alkoholiams ir tristerinams) (Garoff *et al.* 1999, 2002). Priešingai, tokie užpildai kaip kalcio karbonatas, silicis, sintetinis silicis didina trintį (Garoff *et al.* 2002, Fellers *et al.* 1998). Užpildo dydis ir forma yra dominuojantys faktoriai (Garoff *et al.* 2002). Didesni trinties koeficientai tarp kreidinių popierių yra susiję su užpildų kiekiu jų struktūroje (Enomae *et al.* 2006, Rättö 2012). Kaip ir daugumos medžiagų, popieriaus statinis trinties koeficientas visada didesnis už kinetinį trinties koeficientą. Išimtis kai kurios kreidinio popieriaus rūšys, kuomet yra atvirkščiai (Niskannen 2008). Popieriaus trinties koeficiento vertė priklauso nuo dviejų faktorių – paviršių adhezijos ir paviršiaus nelygumo deformacijos. Šių faktorių indėlis nagrinėtas daugelyje darbų, referuotų (Niskannen 2008), tačiau kuris faktorius dominuoja, nėra nustatyta. Pvz., vienuose darbuose nurodoma, kad glotnaus paviršiaus popieriaus trintis yra didesnė, o kituose, kad popieriaus trintis mažai priklauso nuo jo šiurkštumo (Johansson *et al.* 1998). Kai yra spausdinama ant popieriaus, keičiasi ir adhezinės savybės, ir popieriaus paviršius, kas turėtų keisti trinties savybes. Deja, publikacijų, kuriose būtų tirtos spaudinių ant popieriaus trinties savybės, nebuvo rasta.

1.2.5. Kompozicinių medžiagų savybių nustatymo metodai

Daugumą popierių mechaninių ir optinių savybių nusako popieriaus gamintojai popierių apibūdinančiose specifikacijose. Didesnė problema yra nustatyti spaudinių ant popieriaus kaip kompozicinių medžiagų savybes. Labiausiai žinomas ir bendriausias tamprumo rodiklių nustatymo metodas yra statiniai bandymai. Egzistuoja keletas standartų, nustatytus šiuos bandymus (ISO, TAPPI ir. t. t.). Spaudiniams reikėtų taikyti popierių standartus. Nepaisant šių standartų griežto laikymosi, praktika rodo, kad net menkiausias netikslumas gali ženkliai įtakoti rezultatų tikslumą (Levesque 2003, Ragauskas 2009). Tokiais atvejais standartas numato, kaip reikia paruošti bandinį, kad rezultatai būtų pakankamai tikslūs. Praktikoje kompozicinių medžiagų tempimo bandymai atliekami, bandinį įtvirtinus įrengimo galuose kaiščiais arba spaustuose. Bandinį įtvirtinus kaiščiais atsiranda tikimybė, kad bandinio galai nutrūks pridėjus net ir nedidelę apkrovą. Skerspjuvio pasikeitimo vieta atlieka įtempimų koncentratoriaus vaidmenį. Bandinį įtvirtinant spaustuose, ties užspaudimo vieta taip pat susidaro įtempimų koncentracija, kuri iškreipia kompozicinių medžiagų bandymų rezultatus. Be to,

bandinio galuose sukuriama šalutiniai įtempimai, kurie nėra išsidėstę išilgai vienos kurios nors ašies atžvilgiu, todėl neigiamai įtakoja bandymo rezultatus (Berthelot 1999). Spaudiniams reikėtų taikyti popierių standartus, tačiau tikslinga tiesioginius matavimus atlikti platesniame režimų (pavyzdžiui, deformacijos greičio) diapazone.

Be tiesioginių matavimų, yra tikslinga tirti spaudinius skaitmeniniais metodais, kurie leidžia gauti daugiau informacijos. Tokioms ganėtinai sudėtingoms struktūroms tirti dažnai yra naudojamas baigtinių elementų metodas (BEM). Identifikuojant tamprumo rodiklius BEM yra apjungiamas su eksperimentiniais vibraciniais tyrimais ir, kadangi dažnai yra sunku nustatyti atskirų komponentų parametrus, sprendžiamas atvirkštinis uždavinys (Edwins 1986, De Visser 1997, Hwang 2006, Ragauskas 2009). Minėtuose darbuose buvo tiriamos kompozicinės medžiagos, susidedančios iš stiklo ar anglies pluošto su epoksidine dispersija. Tikriniai dažniai ir atitinkamos modų formos gaunamos iš vibracinių bandymų, tamprumo rodikliai skaitmeniniame modelyje keičiami tol, kol spėjamos dinaminės savybės atitinka vibracinio bandymo rezultatus, t. y. sprendžiamas atvirkštinis mechanikos uždavinys. Tokios metodikos buvo sėkmingai panaudotos, pavyzdžiui, modeliuojant ir tiriant sluoksniuotas struktūras (Ragauskas ir Skukis 2007, Ragauskas ir Belevičius 2009, Ragauskas 2010). Sėkmingai šiais metodais buvo tirtos popieriaus juostos dinaminės charakteristikos. Kulachenko su bendraautoriais (Kulachenko 2007abc) pritaikė BEM (parinko tinkamiausius kevalus ir kt.) tirti popieriaus juostos raukšlėjimąsi. Svarbu yra tai, kad buvo tirtas ne tik popierius, kurio tamprumo savybės buvo vienodos visame plote, bet popierius su netvarkingai išdėstyta deformacija (skirtingas drėgmės kiekis). Šis rezultatas parodė BEM galimybes identifikuoti ne tik ištisinių atspaudų tamprumo charakteristikas, bet ir galimybę tirti spaudinius, kuriuose dažų sluoksnis yra ne ištisinis, o atitinka spausdintą informaciją.

1.3. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Literatūros apžvalga rodo, kad duomenų apie spaudinių, kaip kompozicinių medžiagų, susidarančių spaudos procese, savybes, išskyrus kai kurias spaudinių spalvines charakteristikas, nėra.

2. Popierių mechaninės ir spalvinės savybės yra eksperimentiškai plačiai ištirtos naudojant standartines metodikas. Keliose publikacijose popieriaus juostos dinaminės charakteristikos buvo modeliuojamos skaitmeniniais metodais.

3. Spaudinių savybės lemia pagrindines galutinio spausdintinio produkto savybes, todėl tikslinga ištirti spaudinių mechanines ir spalvines savybes kompleksškai.

4. Darbo tikslui pasiekti darbe reikia spręsti šiuos uždavinius:
- ištirti spaudinių, gautų skirtingais spaudos būdais ant įvairių tipų popierių, tamprumo savybes,
 - ištirti spaudinių, gautų skirtingais spaudos būdais ant įvairių tipų popierių, atsparumo tempimui ir daugkartiniam lankstymui bei deformacines savybes ir nustatyti jų kaitos dėsningumus,
 - ištirti popieriaus ir spaudinių, gautų skirtingais spaudos būdais ant įvairių tipų popierių, trinties savybes ir nustatyti jų kaitos dėsningumus,
 - ištirti spaudinių, gautų skirtingais spaudos būdais ant įvairių tipų popierių, spalvines charakteristikas ir nustatyti jų kaitos dėsningumus,
 - pritaikyti baigtinių elementų metodą (BEM) spaudinių modeliavimui ir nustatyti jų tamprumo rodiklius, taikant atvirkštinio inžinerinio uždavinio sprendimo koncepciją.

Spaudinių ant popieriaus tyrimų metodologija, naudotos medžiagos

Eksperimentinio tyrimo metodika sudaryta siekiant išaiškinti galimus įvairių dažų poveikius popieriaus ir kartono struktūrai ir savybėms. Tyrimui atrinkti dažniausiai taikomi keturi spaudos būdai: fleksografinis, ofsetinis ir skaitmeniniai rašalinis bei lazerinis (elektrofotografinis). Šiais spaudos būdais gauti tyrimams reikalingi skirtingo spalvingumo bei dažų sluoksnio storio spaudiniai. Pateiktos spausdinių mechaninių ir optinių spaudinių savybių tyrimo metodikos bei tyrimo priemonės, reikalingos įvykdyti numatytus darbo uždavinius. Taip pat aprašyta spaudinių tamprumo rodiklių nustatymo tyrimo metodika naudojant skaitmeninius ir vibracinius metodus.

Skyriaus tematika paskelbti devyni autorės straipsniai (Grigaliūnienė *et al.* 2015), (Ragauskas *et al.* 2015a), (Grigaliūnienė *et al.* 2014a), (Grigaliūnienė *et al.* 2014b), (Grigaliūnienė *et al.* 2014c), (Grigaliūnienė *et al.* 2014d), (Grigaliūnienė *et al.* 2013a), (Grigaliūnienė *et al.* 2013b), (Grigaliūnienė *et al.* 2013c).

2.1. Tyrimams naudotos medžiagos

2.1.1. Popieriaus rūšių parinkimas

Vienas svarbiausių popieriaus fizikines savybes įtakančių veiksnių yra jo struktūra. Nuo jos priklauso popieriaus stiprumas, paviršiaus šiurkštumas, spalvinės savybės.

Darbe buvo siekiama išbandyti skirtingų struktūrų popierių ir kartoną, kadangi dažų, kurie dengia paviršių spaudinio susidarymo metu, sąveika su paviršiumi priklauso nuo popieriaus struktūros. Tyrimams buvo naudojami skirtingų rūšių bei gramatūrų kreidinis, nekreidinis popierius bei kartonas, kurie dažniausiai naudojami spaustuvėse. Šių medžiagų sąrašas pateikiamas 2.1 lentelėje, popierių specifikacijos ir aprašas 1 priede.

2.1 lentelė. Tyrimams naudoti popieriai ir kartonai

Table 2.1. Paper and cardboard grades used for experiments

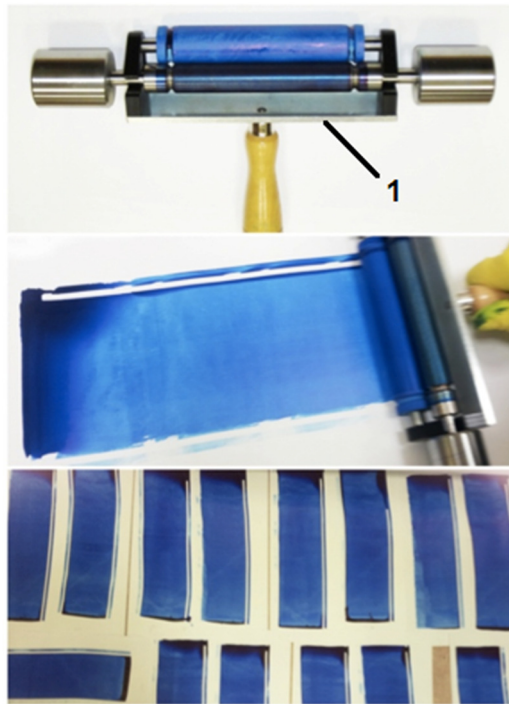
Nr.	Popieriaus pavadinimas	Rūšis	Gramatūra, g/m ² Storis mm
1.	<i>Maxi offset</i>	Nekreidinis	100
2.	<i>4CC</i>	Nekreidinis	100, 200
3.	<i>Galerie art silk</i>	Kreidinis	150, 300
4.	<i>Digigreen silk</i>	Kreidinis	150, 300
5.	<i>Lomond</i>	Fotopopierius	130
6.	<i>Arktika</i>	Kartonas	275, 300
7.	<i>Invercote creato</i>	Kartonas	300
8.	<i>Carda solida</i>	Kartonas	300

2.1.2. Spaudinių gamyba

Spaudos proceso metu tiesioginė sąveika tarp dažų ir substrato (dažniausiai popieriaus) didele dalimi lemia spaudinio savybes. Ši sąveika priklauso nuo popieriaus ir dažų komponentų ir, pirmiausiai, nuo dažų rišiklio, o skystuose dažuose ir nuo tirpiklio (Kipphan 2002, Thompson 2004, Manoj *et al.* 2013). Tyrimams naudoti modeliniai spaudiniai su ištisiniu dažų sluoksniu.

Fleksografiniai spaudiniai. Spaudiniai tyrimams buvo gaminami, dengiant popieriaus paviršių ištisiniu įvairaus storio fleksografinių dažų sluoksniu. Dengimui dažais naudotas rankinis *K Lox* įtaisas su įvairaus paviršinio tūrio

aniloksiniais voleliais (2.1 pav.). Popierius buvo dengiamas mėlynos spalvos fleksografiniais vandeniniais dažais 12-114 147-7 Unibase blue (*Siegwerk Group*). Nedidelis dažų kiekis tepamas ant lapo ir braukiant voleliu dažai tolygiai paskleidžiami ant popieriaus paviršiaus (2.1 pav., 1). Aniloksinis volelis užtikrina pastovų dažų kiekį ant popieriaus. Naudoti aniloksiniai voleliai su šiais paviršinio tūriais: 400/5 volelis – $4,3 \text{ cm}^3/\text{m}^2$ paviršinio tūrio akutės, 200/12 – $10,2 \text{ cm}^3/\text{m}^2$, 180/14 – $16,6 \text{ cm}^3/\text{m}^2$ ir 100/18 – $39,1 \text{ cm}^3/\text{m}^2$. Dažų sluoksnio storis buvo vertinamas tik pagal aniloksinio volelio tūrį, neįskaitant dažų, likusių ant duobučių sienelių.



2.1 pav. Popieriaus dengimas aniloksinio voleliu fleksografiniais dažais

Fig. 2.1. Paper coverage with flexographic ink using anilox roller

Ofsetiniai spaudiniai. Ofsetiniai spaudiniai buvo gaminami dažų testavimo įranga *IGT C1* (2.2 pav.). Testavimo įrenginiu buvo gauti ofsetiniai spaudiniai, kurių dažų storio vertės vidurkiai: 1 – $0,91 \text{ } \mu\text{m}$, 2 – $1,86 \text{ } \mu\text{m}$, 3 – $2,56 \text{ } \mu\text{m}$, 4 – $3,47 \text{ } \mu\text{m}$.

Dažų perdavimo mazgas susideda iš dviejų varomų aliuminio volelių (2.2 pav., 1) ir ritinėlio (2.2 pav., 2) virš jų. Nedidelis dažų sluoksnis mentele tepa-

mas ant guminio ritinėlio. Dažai pasiskirsto besukant volelius 30 s. Ant spausdinimo cilindro dažai perkeliami sukant volelius 15 s (*IGT C1*...). Dažai nuo spausdinimo cilindro tiesiogiai perkeliama ant popieriaus (2.2 pav. 3). Standartinis spausdinimo volelis yra padengtas guma. Šis volelis yra sveriamas, kai dažai yra ant jo, ir dar sykį po dažų padengimo ant bandinuko. Masių skirtumas rodo, kiek dažų buvo perkelta ant popieriaus. Pagal šį kiekį nustatomas dažų sluoksnio storis.



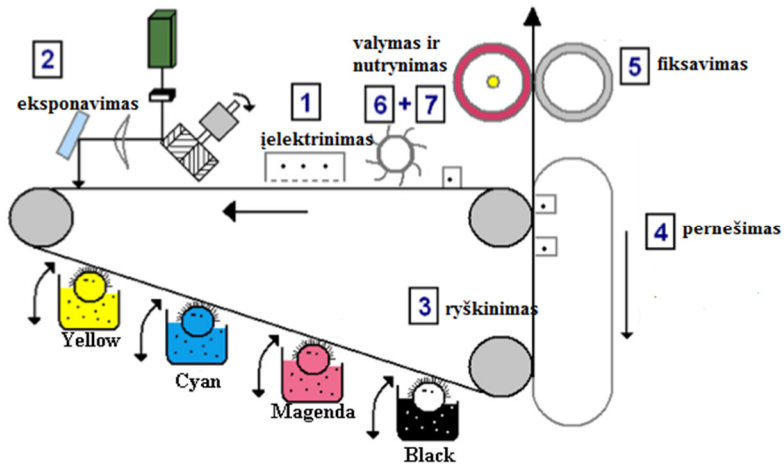
2.2 pav. Dažų testavimo įranga *IGT C1*

Fig. 2.2. Ink testing device *IGT C1*

Skaitmeniniai spaudiniai. Siekiant gauti spaudinius su skirtingo storio tonerio sluoksniais, rašaliniu ir lazeriniu spaudos būdu, buvo spausdinami spaudiniai, sudaryti iš vieno kontūrinės spalvos sluoksnio (100 % K) ir iš keturių CMYK spalvų sluoksnių (100 % CMYK).

Rašaliniai pilno dengimo spaudiniai buvo spausdinami rašaliniu spausdintuvu *Epson L800* Epson rašalais T6734, T6733, TT6732 ir T6731. Ištininės rašalo lašelių srovės formavimo technologijos pagrindu pagamintos spausdinimo galvutės rašalo lašelius perkelia ant spaudinio. Suformuoti rašalo lašeliai būna 8–10 μm skersmens ir skrieja 20–25 m/s greičiu (Hudd 2010, Castrejón-Pitaro *et al.* 2013).

Lazeriniai spaudiniai gauti spausdinant sausuoju toneriu spausdinimo mašina *Xerox 8000* (2.3 pav.).



2.3 pav. Pagrindiniai lazerinės spaudos technologijos etapai
(Chen 2009)

Fig. 2.3. The main stages of laser printing technology

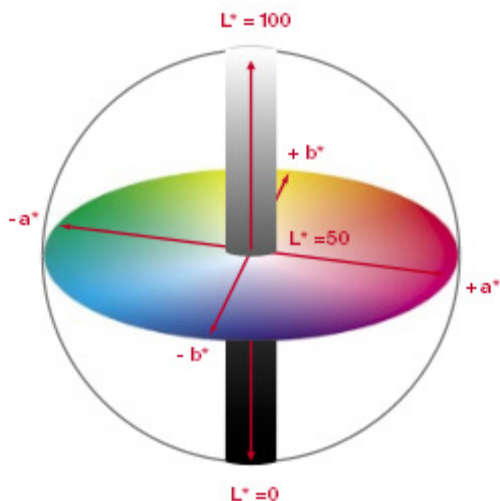
Ši mašina sudaryta iš septynių dalių (2.3 pav.): 1 – įelektrinimo, 2 – eksponavimo, 3 – ryškinimo, 4 – perkėlimo, 5 – fiksavimo, 6 – valymo ir 7 – nutrynimo (Chen 2009, Xerox 2009). Lazerinė (elektrofotografinė) spausdinimo technologija – tai technologija, kurioje regimasis atvaizdas sukuriama naudojant sausąjį tonerį, kurio dalelių skersmuo iki 10 μm .

2.2. Tyrimų metodika ir aparatūra

Nuo plaušelių išsidėstymo popieriuje priklauso ne tik popieriaus, bet taip pat ir spaudinių atsparuminės ir optinės savybės. Šios savybės yra skirtingos išilginei bei skersinei popieriaus kryptims, tad yra tikslinga nustatyti popieriaus kryptį prieš pradedant atlikti eksperimentus. Šiam bandymui atlikti iš visų tiriamų popieriaus rūšių buvo iškerpama po dvi statmenų kryptų juostelės, kurių matmenys 15×200 mm. Paėmus pirštais už juostelių galų ir permetus iš vienos pusės į kitą, galima pastebėti, kad išilginės (mašininės) krypties juostelė yra standesnė.

2.2.1. Spalvinių savybių matavimas

Popieriaus ir spaudinių spalvinės charakteristikos matuotos spektrofotometru *Techkon Spectro Dens* ir pateikiamos CIE $L^*a^*b^*$ erdvėje (ISO 13655) pateikiama 2.4 paveiksle.



2.4 pav. Tolygi CIE $L^*a^*b^*$ spalvų erdvė

Fig. 2.4. CIE $L^*a^*b^*$ colour space

Prietaiso charakteristika: apertūra 3,0 mm, matavimo diapazonas nuo 400 iki 700 nm, kalibravimas pagal instaliuotą balto etaloną, rodmenų atkartojimas 0,01 B ir 0,03 CIE $L^*a^*b^*$.

2.2.2. Sugerties matavimas

Dažai popierių suvilgo (tai būtina spausdinimo sąlyga) ir, priklausomai nuo popieriaus savybių, kiek tai įsigeria. Nuo to, kiek dažai įsigeria, priklauso spausdinio optinės savybės, įsigėrę dažai keičia ir kitas popieriaus savybes. Dažų į popierių sugerties matavimui buvo naudojamas *Bristovo* sugerties rato metodas, kuris leidžia nustatyti skysčių sugertį esant skirtingam dažų ir popieriaus laikui (Bristow 1967). Šis metodas leidžia dažų sugertį vertinti sąlygomis, artimomis spausdinimo procesui, t. y. esant trumpam kontakto laikui ir ribotam dažų kiekiui.

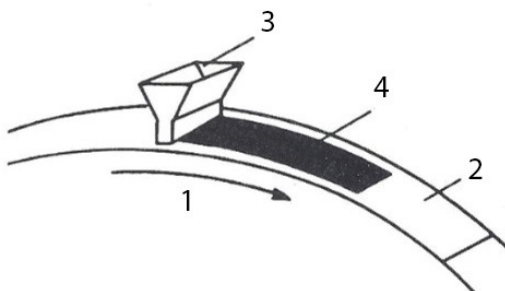
Aparato pagrindą sudaro aliuminis ratas, kurio perimetras yra lygus 1 metrui. Rato plotis 25 mm pločio pagrindas, prie kurio pritvirtinamas popieriaus bandinys. Skysčio rezervuaras yra sumontuotas ant svirties virš rato ir gali būti pakeliamas arba nuleidžiamas. Rezervuaras prie bandinio yra spaudžiamas 20 KN jėga, sukurdamas slėgį, artimą spausdinimo slėgiui. Ratas varomas elektros variklio (2.5 pav.). Kai ratas sukasi liesdamasis su skysčio rezervuaru, žinomas skysčio kiekis per angą patenka ant popieriaus ir palieka pėdsaką (2.6 pav.). Angos plotis yra 1 mm, o ilgis – 20,0 mm.

Skirtingų rūšių popierių sugerčiai nustatyti naudoti fleksografiniai dažai *Siegwerk* 12-114147-7.1470 Unibase blue. Matavimai atlikti su aštuoniais skirtingais rato sukimosi greičiais: 0,05, 0,1, 0,2, 0,5, 1,0, 2,0, 5,0 ir 10,0 cm/s.



2.5 pav. *Bristovo* sugerties ratas

Fig. 2.5. *Bristow's wheel*



2.6 pav. *Bristovo* rato veikimo metodas: 1 – aliumininis ratas, 2 – pagrindas, ant kurio tvirtinamas bandinys, 3 – skysčio rezervuaras, 4 – skysčio paliktas pėdsakas ant bandinio

Fig. 2.6. Operation of *Bristow's wheel*: 1 – aluminium wheel, 2 – base for sample fastening, 3 – ink reservoir, 4 – liquid trace on sample

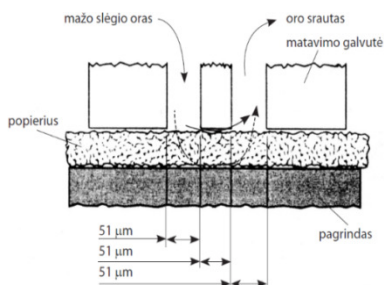
Išmatavus dažų pėdsako ilgį, pagal 2.1 formulę apskaičiuojamas sugerties koeficientas A kiekvienam greičiui, kuris atitinka tam tikrą kontakto laiką. Pagal koeficiento priklausomybę nuo kontakto laiko kvadratinės šaknies galima spręsti apie dažų vilgymo ir jų įsigerties vaidenį esant ribotam kontakto laikui.

$$A = \frac{V}{L \cdot W} \quad (2.1)$$

čia A – sugerties koeficientas (cm^3/m^2), V – skysčio tūris (cm^3), L – pėdsako ilgis (m), W – pėdsako plotis (m).

2.2.3. Paviršiaus šiurkštumo matavimas

Šiurkštumas buvo matuotas spausdinimo sąlygas atitinkančiu *Parker Print-Surface* metodu (PPS). Šiuo metodu matuojamas oro prasiskverbimas tarp popieriaus ir prispausto siauro žiedo (2.7 pav.). Nustatomas oro prasiskverbimo greitis cm^3/s , pagal kurį skaičiuojamas popieriaus paviršiaus PPS šiurkštumas, išreiškiamas mikrometrais. Matavimai atlikti PPS matavimo prietaisu *L&W SE 165PPS Tester* (2.8 pav.), esant 0,5, 1 ir 2 MPa slėgiui. Kiekvienas popieriaus ir spausdinio bandinys buvo matuotas po tris kartus ir skaičiuotas aritmetinis verčių vidurkis. Prietaisas pagal matavimų diapazoną ir tikslumą atitinka ISO 8791-4, BS 6563 ir TAPPI T555 standartų reikalavimus.



2.7 pav. *Parker Print-Surface* popieriaus šiurkštumo matavimo galvutė

L&W SE 165 PPS Tester

Fig. 2.7. *Parker Print-Surface* paper roughness measurement head *L&W SE 165 PPS Tester*



2.8 pav. *Parker Print-Surface* šiurkštumo matavimo įrenginys *L&W SE 165 PPS Tester*

Fig. 2.8. *Parker Print-Surface* roughness measurement device *L&W SE 165 PPS Tester*

2.2.4. Atsparumo lankstymui matavimas

Popieriaus atsparumas daugkartiniam lankstymui yra popieriaus savybė atlaikyti tam tikrą lenkimo skaičių iki nutrūkstant. Ši savybė dažniausiai yra svarbesnė spausdinimams. Atsparumui lankstymui nustatyti naudojamas dvigubų lenkimų

metodas (ISO 5626:1993 standartas). Naudojant šį metodą, įtempta (tempimo jėga 10 N) popieriaus juostelė lankstoma į abi puses prietaisu falceriu (Sidaravičius 2012: 10).

Bandymui buvo paruoštos 10×100 mm dydžio popieriaus ir spaudinių juostelės. Atlikta po 10 matavimų su kiekviena popieriaus rūšimi išilgine ir skersine popieriaus liejimo kryptimis ir skaičiuotas atlaikytų iki nutrūkstant dvigubų lenkimų skaičiaus aritmetinis vidurkis.

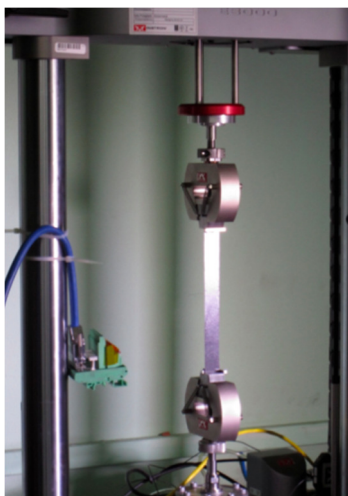
2.2.5. Tempimo savybių matavimas

ISO standartas 1924 (LST EN ISO 1924-2:2009) numato šias popieriaus tempimo savybes: atsparumą tempimui – trūkio jėgą, pailgėjimą tempiant, ir sugertą energiją. Atsparumas tempimui ir pailgėjimas tempiant buvo matuotas dinamometru – tempimo mašina *PMB-30-2M*.

Tempimo mašiną *PMB-30-2M* sudaro švytuoklinis jėgos matuoklis, pailgėjimo matavimo mechanizmas ir reguliuojamoji elektrinė pavara. Bandinio juostelė įtvirtinama gnybtuose ir lengvai įtempama. Kai tempimo mašinos apatinis gnybtas leidžiasi, popieriaus juostelė tempiasi. Juostelei plystant, apatinis gnybtas automatiškai sustoja ir fiksuojama trūkio jėga bei pailgėjimas. Trūkio jėgos ir pailgėjimo vertės yra 10 matavimo rezultatų aritmetinis vidurkis, o pagal duomenų sklaidą vertinamos eksperimento paklaidos neviršija $\pm 5\%$.

Be trūkio jėgos ir pailgėjimo yra svarbu vertinti spausdinio pailgėjimo tempiant priklausomybę nuo įtempio ir nustatyti tamprumo modulio vertę. Šios charakteristikos buvo matuotos Rygos technikos universitete įrenginiu *Instron Electropulse E3000* (2.9 pav.). Tai elektrodinaminis prietaisas, skirtas dinaminių ir statinių charakteristikų matavimams su plataus diapazono medžiagomis.

Spaudiniai įtempiami tarp dviejų gnybtų, kaip parodyta 2.9 paveiksle. Nustatytas standartinis (TAPPI 2006) tempimo greitis 5 mm/min. Taip pat atlikti tyrimai su greičiais 0,5, 1, 2 ir 5 mm/min. Tempimo savybėms nustatyti buvo paruošta kiekvienam popieriui ir spaudiniui po dešimt 180×25 mm dydžio juostelių išilgine ir skersine popieriaus liejimo kryptimis. Spaudiniai buvo laikyti laboratorijoje laikantis standarto (ISO 1924 - 1:1992(E)) nustatytų aplinkos sąlygų (18 ± 1 °C; 50 ± 2 %).



2.9 pav. Bandinys, įtemptas tarp gnybtų įrenginyje
Electropulse E3000

Fig. 2.9. Sample between grips in instrument
Electropulse E3000

Jungo modulio vertė skaičiuojama pagal formulę:

$$E = \frac{(F_2 - F_1) \cdot l_1}{(u_2 - u_1) \cdot A} \quad (2.2)$$

čia F_2 – tempimo jėga (N), kai pailgėjimas 40% nuo maksimalaus, F_1 – tempimo jėga (N), kai pailgėjimas 20% nuo maksimalaus, l – bandinio ilgis (mm), u_2 – bandinio pailgėjimas (mm), lygus 40% nuo maksimalaus, u_1 – pailgėjimas mm, lygus 20% nuo maksimalaus, A – bandinio skerspjūvio plotas (mm^2), l_1 – bandinio ilgis.

2.2.6. Trinties savybių matavimas

Statiniai ir kinetiniai trinties popierius-popierius, popierius-atspaudas ir atspaudas-atspaudas koeficientai buvo matuojami *Thwining – Albert FPDAS 1.0.0.1* horizontaliosios plokštumos trinties matavimo įrenginiu (2.10 pav.). Trinties koeficientai nustatomi iš „rogučių“ traukimo jėgos (toliau trinties jėga) kaitos grafiko (2.11 pav.): statinio trinties koeficiento (STK) vertė skaičiuojama pagal maksimalią trinties jėgos vertę, o kinetinio trinties koeficiento (KTK) vertę – pagal jėgą, kai jos vertė tampa stabili. Matavimai atlikti pastoviu 100 mm/min

slydimo greičiu keičiant apkrovą, t. y. slėgį tarp slystančių paviršių. Tikras kontakto tarp paviršių plotas nėra žinomas, tai rezultatai daugiausiai pateikti pažymint tik apkrovą (rogučių matmenys 40x40 mm).

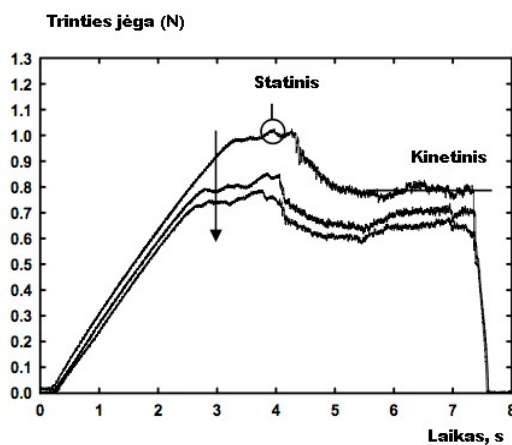


2.10 pav. Trinties matavimo įrenginys

Thwining – Albert FPDAS

Fig. 2.10. The scheme of friction measurement device

Thwining – Albert FPDAS



2.11 pav. „Rogučių“ tempimo jėgos kaita laike ir statinio bei kinetinio trinties koeficientų verčių nustatymas

Fig. 2.11. The change of sled pulling force (friction force) during sliding and the determination of static and kinetic coefficients of friction

Eksperimente per pirmąsias slydimo 5 sekundes yra nustatoma statinio trinties koeficiento vertė, o kinetinio trinties koeficiento vertė skaičiuojama 10–20 sekundžių diapazone. Matavimai buvo atliekami 4 kartus ir koeficientų vertės yra laikomos tikros, kai sutampa su ankstesnių eksperimentų vertėmis. Eksperimentai buvo atliekami esant $23,0 \pm 1,0^{\circ}\text{C}$ temperatūrai ir $50,0 \pm 2,0$ procentų santykiniai drėgmei. Naudoti matavimų režimai pateikti 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė. Trinties matavimų režimai

Table 2.2. The regimes of friction tests

Nr.	Trintis	Slydimo greitis, mm/min	Apkrova, g	Eksperimento laikas, s
1.	Popierius – popierius	100	200, 400, 600, 800, 1000	20
2.	Popierius – popierius	50, 100, 150, 200	200, 600	20
3.	Popierius – atspaudas	100	200, 400, 600, 800, 1000	20
4.	Atspaudas – aspaudas	50, 100, 150, 200	200, 400, 600, 800, 1000	20

Buvo matuojama trintis tarp dviejų popieriaus paviršių, popieriaus ir atspaudų paviršiaus bei dviejų atspaudų paviršių. Trinties koeficientų vertės buvo nustatomos keičiant slėgį tarp paviršių (200–1000 g) ir slydimo greitį (50–200 mm/min). Buvo nustatytas pastovus 20 s eksperimento laikas.

2.3. Popieriaus ir spaudinių tamprumo rodiklių identifikavimo technologija

Mechanikoje sprendžiant inžinerinį uždavinį, pirmiausiai atliekamas reikalingo objekto teorinis tyrimas. Sudaromas jo matematinis modelis, kurio pagalba, pasitelkiant įvairius matematinius sprendimo metodus ar programinius paketus, nustatinėjamos reikiamos charakteristikos. Po to tas pats objektas (ar jo modelis) tiriamas natūrinio eksperimento būdu, gauti praktiniai rezultatai lyginami su atitinkamais teoriniais ir sprendžiama apie sukurto teorijos teisingumą.

Mūsų atveju, kai tiriamasis objektas yra atspaudas, susidedantis iš kelių sluoksnių (popierius, dažai, lakas ir t. t.), kiekvienas kurių yra plonas ir turi skirtingus tamprumo rodiklius, sudaryti jo matematinį modelį bendrą tamprumo ro-

diklį nustatyti yra gana sudėtingas uždavinys. Todėl racionalu pasitelkti atvirkščią metodiką – pirmiausiai su natūraliu tiriamu objektu (mūsų atveju popieriaus lapu ir kiek norima sluoksnių dažų ant jo) nustatyti tikrinių virpesių dažnius ir modas natūrinio eksperimento būdu, po to, sudarius matematinį modelį, nustatyti tuos pačius dydžius matematiškai. Pasitelkus genetinį algoritmą (apie jį plačiau kalbama vėliau), matematiniam modelyje yra galimybė tamprumo rodiklių vertes keisti tol, kol jo tikriniai virpesių dažniai sutaps su natūrinio eksperimento metu gautais dažniais. Tuomet bus galima teigti, kad matematiniam modelyje naudoti tamprumo rodikliai atitinka tikrąsias bandinio vertes. Toks būdas yra vadinamas atvirkštiniu inžineriniu uždaviniu. Nustatyti tamprumo rodikliai atitinka viso bandinio, bet ne tam tikro jo sluoksnio parametrus. Tamprumo rodiklių nustatymo technologijos patvirtinimui buvo atlikti eilė eksperimentai su skirtingais bandiniais: popieriaus lapu bei su spaudiniais ant jo. Papildomai spaudiniai buvo lakuoti, ir tokiu būdu susidarė trisluoksniė kompozicinė medžiaga.

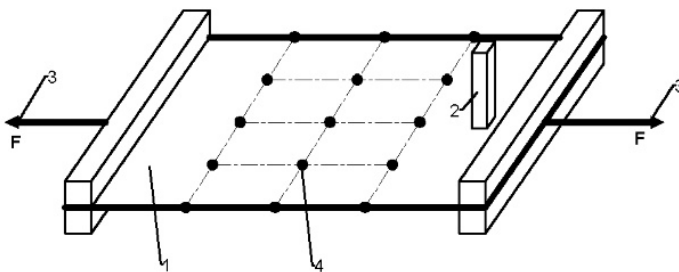
2.3 lentelė. Bandinių geometriniai ir tamprumo parametrai

Table 2.3. Geometrical and elasticity parameters of samples

Duomenys	P1	P2	P3
Ilgis, mm	200	200	
Plotis, mm	200	200	
Storis, μm	100	100	
Gramatūra, g/m^2	80	80	
Jungo modulis E_1 , GPa (išilginė kryptis)	1,0	Bus nustatinėjamas	
Jungo modulis E_2 , GPa (skersinė kryptis)	0,39	Bus nustatinėjamas	
Puasono koeficientas ν_{12} (išilginė kryptis)	0,40	Nebus nustatinėjamas	
Puasono koeficientas ν_{23} (skersinė kryptis)	0,14	Nebus nustatinėjamas	
Tankis, kg/m^3	800	800	
Dažų storis, mm	-	0,005	
Lako storis, mm	-	0,003	
Visas storis, mm	0,1	0,108	

Bandymo įranga ir medžiagos. Tyrimams pasirinktas nekreidinis popierius *Maxi offset* 80 g/m². Spaudiniai (juodos spalvos) ant šio popieriaus atlikti skaitmenine (lazerine) spausdinimo mašina. Šių bandinių duomenys, toliau saugomi pavadinimais P1 (popierius be spaudos), P2 (visiškai dengtas popierius dažais ir UV laku) ir P3 (dalinai dengtas popierius dažais ir visiškai laku), pateikti 2.3 lentelėje.

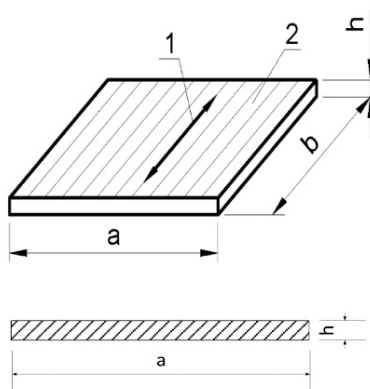
Bandiniai įtvirtinami specialiuose kreipiniuose, kad būtų išlaikyta bandinių plokščia forma (2.12 pav.). Kreipiniai savo ruožtu buvo tvirtinami spaustuose, kad būtų sukurta įtempimo jėga F . Šis įtempimas reikalingas tam, kad būtų padidintas bandinių stangrumas, išryškėtų tikrinių virpesių modos ir būtų užtikrintos eksperimento kraštinės sąlygos. Bandiniai buvo žadinami pjezoelektriniu keitikliu, kontaktuojančiu su bandinio paviršiumi, keičiant virpinimo dažnių intervalą nuo 10 iki 1000 Hz. Pjezoelektrinio keitiklio vieta (2) buvo pasirinkta eksperimentiškai, stengiantis sukelti didesnes bandinio virpesių amplitudes. Matavimai atlikti bekontaktiniu 15 taškų metodu. Taškai simetriškai išdėstyti bandinio paviršiuje. Tikriniai dažniai ir modų formos gauti modalinės analizės programine įranga. Eksperimento metu įtempis didinamas nuo 200 N/m iki 2000 N/m, kas 200 N/m.



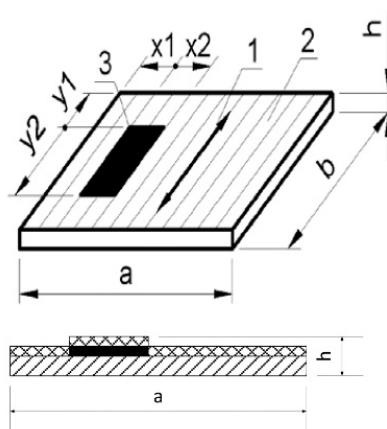
2.12 pav. Bandinio įtempimo ir žadinimo schema: 1 – bandinys, 2 – pjezoelektrinis keitiklis, 3 – įtempimo jėga, 4 – matavimo taškai

Fig. 2.12. Scheme of sample clamping and vibration excitation: 1 – sample, 2 – piezoelectric transducer, 3 – pretention force, 4 – measuring points

Popierius yra modeliuojamas kaip ortotropinė medžiaga. Bandinių P1 ir P3 modeliai pavaizduoti 2.13 ir 2.14 paveiksluose. Netolygus dažų išdėstymas bandinyje P3 buvo pasirinktas tam, kad būtų galima nustatyti dažų poveikį spaudinių parametrams. Spaudinių tamprumo rodikliai priklauso nuo spaudinio dažų storio bei išdėstymo vietos, tad gerai žinomi tempimo ir deformacijos tyrimo metodai šiuo atveju yra netinkami.



2.13 pav. P1 modelis ir pjūvis: 1 – išilginė kryptis, 2 – popieriaus lapas
Fig. 2.13. Model and cross section of the sample P1: 1 – machine direction, 2 – paper



2.14 pav. P3 modelis ir pjūvis: 1 – išilginė kryptis, 2 – popierius lapas, 3 – atspauda vieta, x_1 , x_2 , y_1 , y_2 – atspauda dydis ir vieta
Fig. 2.14. Model and cross section of the sample P3: 1 – machine direction, 2 – paper, 3 – printed area, x_1 , x_2 , y_1 , y_2 – print size and position

Spausdinimo proceso metu popierius padengiamas dažų sluoksniu, kuris keičia fizikines popieriaus savybes, nes dažai įsigeria į popierių bei sukuria papildomą sluoksnį jo paviršiuje. Kadangi sausas dažų sluoksnis (laikomas izotropine medžiaga) ant popieriaus (laikomu ortotropine medžiaga) gali įtakoti spausdinio fizikinius parametrus, yra tikslinga ištirti šią įtaką. Po kiekvienos spausdinimo stadijos popieriaus paviršiuje susidaro nauji sluoksniai, kurie gali iš esmės pa-

keisti spaudinio tamprumo rodiklius. Šio tyrimo esmė yra sukurti universalų metodą, tinkamą įvairiems spaudos pramonėje naudojamiems gaminiams.

Popierius kaip ortotropinė medžiaga gali būti apibūdinama šešiais nepriklausomais tamprumo rodikliais:

$$\begin{aligned} E_1, E_2 = E_3, \nu_{12} = \nu_{13}, \nu_{23}, G_{12} = G_{13}, \\ G_{23} = E_2 / 2(1 + \nu_{23}), \end{aligned} \quad (2.3)$$

čia 1, 2 ir 3 nusako popieriaus išilginę kryptį, skersinę kryptį ir atitinkamai z-kryptį.

Norint supaprastinti identifikavimo uždavinį – vietoje trimačio uždavinio nagrinėti dvimatį – įvedama prielaida, kad Puasono koeficientai visomis kryptimis vienodi:

$$\begin{aligned} E_1, E_2 = E_3, \nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{23}, G_{12} = G_{13} = \\ G_{23} = E_2 / 2(1 + \nu_{12}), \end{aligned} \quad (2.4)$$

Tamprumo rodiklių nustatymas formuluojamas kaip optimizavimo uždavinys, kur skirtumai tarp matematinio modelio rezultatų ir duomenų, gautų po vibracinių bandymų, yra minimizuojami genetiniu algoritmu. Problemos formulavimas pateikiamas taip:

$$F(X) = \sum^n \left(\frac{f_i^{BEM} - f_i^{NE}}{f^{NE}} \right)^2 \quad (2.5)$$

čia F yra ieškomų kintamųjų tikslo funkcija, o $X = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_m]$ yra optimizavimo kintamieji: $x_i \leq x_i \leq x_i$ $i = 1, 2, 3, \dots, m$, Šiame uždavinyje ieškomi kintamieji yra Jungo modulis ir Puasono koeficientas: $X = [E_1, E_2, \nu_{12}]$. Kintamasis m yra skaičius, nusakantis ieškomų kintamųjų x_i kiekį. Tikriniai dažniai iš vibracinių tyrimų pateikiami kaip f_i^{NE} (NE – natūralus eksperimentas); duomenys iš

matematinio modelio pateikiami kaip f_i^{BEM} (BEM – baigtinių elementų metodas). Tikrinių virpesių dažnių eilės numeriai tikslo funkcijoje žymimi n . Viršutinis ir apatinis brūkšneliai virš ieškomų kintamųjų yra kintamųjų apatinės ir viršutinės ribos.

Sprendžiant uždavinį BEM'u naudotas pastovus stačiakampis tinklėlis 10×10 ir SHELL63 tipo kevalo elementai. Elementas yra plokščio membraninio ir lenkiamos plokštelės elementų superpozicija, todėl įvertina visus membranišius ir lenkimo efektus ir gali priimti apkrovas tiek elemento plokštumoje, tiek ir statmenai plokštumai. Elementas turi šešis laisvės laipsnius kiekviename mazge: poslinkius dekartinėse x, y ir z ašyse ir posūkius apie x, y ir z ašis. Elementą galima apibūdinti keturiais mazgais, keturiais storiais, tampraus pagrindo stang-

rumu ir ortotropinės medžiagos savybėmis. Ortotropinės medžiagos kryptys atitinka elemento koordinatų kryptis.

Popieriaus bandinio tikrinių virpesių dažniai gali būti nustatomi atliekant natūralų eksperimentą. Reikalingos charakteristikos paaimamos iš literatūros šaltinių, iš anksto žinomi šie parametrai: ilgis, plotis, storis, Puasono koeficientas, elastingumo modulis ir tankis. Efektyvi technologija, skirta ortotropinių medžiagų kaip kompozicinių medžiagų savybėms nustatyti, yra pagrįsta palyginimu eksperimentinių duomenų, gautų vibracinių testų metu, su rezultatais, gaunamais matematiniu modeliavimu ir baigtinių elementų metodo taikymu. Pirmieji tikriniai virpesių dažniai ir tikriniai modų vektoriai gali būti išmatuojami naudojant skirtingus metodus, pvz. impulso technologija arba kontaktiniu matavimu akselerometru. Modeliavimo baigtiniais elementais ir optimizavimo tikslas yra nustatyti medžiagos savybes, vertinant tuos pačius virpesių dažnius ir modas. ANSYS programinis paketas buvo pasirinktas dėl pakankamos baigtinių elementų bibliotekos ir patogaus naudojimosi APDL (Ansys parametrinė programavimo kalba). APDL naudojama kuriant skaitmeninį medžiagos modelį. Optimizavimo uždaviniui spręsti pasirinktas genetinis algoritmas (GA), nes algoritmas nereikalauja žinoti tikslo funkcijos gradientų ir visada garantuoja racionalų sprendinį. GA yra stochastinis globaliojo optimizavimo algoritmas, kuris kiekvieną sykį leidžiant algoritmą teikia skirtingus rezultatus. Todėl visada atliekami keli – keliasdešimt ar keli šimtai nepriklausomų skaitinių eksperimentų – tiek, kad tikslo funkcijos mediana toliau reikšmingai nebekistų. Kai projektavimo kintamųjų tėra 3, kaip šiuo atveju – pakaks kelių nepriklausomų eksperimentų. Iš šių gautų rezultatų atrenkamas geriausias sprendinys. GA veikia taip: atsitiktiniu būdu formuojama projektavimo kintamųjų komplektų grupė – vadinamoji populiacija, o paskiras komplektas yra populiacijos individas, arba genotipas. Tada minėta APDL programa genotipas pakeičiamas skaitmeniniu bandinio modeliu – fenotipu. Suskaičiuojama fenotipui būdinga tikslo funkcijos reikšmė (išraiška (2.5); ją gavus visiems individams toliau mutacijų, kryžminimo, atrankos ir kt. genetinių veiksmų pagalba formuojama kita, geresnė populiacija – ji vadinama nauja generacija. Visi šie veiksmai kartojami tol, kol geriausio individo tikslo funkcijos vertė nebekinta, arba kol pasiekiamas vartotojo nurodytas maksimalus generacijų skaičius.

2.4. Antrojo skyriaus išvados

1. Spaudinių, kaip kompozicinių medžiagų, gaunamų spausdinant skirtingais būdais, tyrimą reikia atlikti kompleksiskai – ištirti tamprumines ir atsparumo tempimui bei daugkartiniam lankstymui savybes, paviršiaus šiurkštumą ir trinties savybes, spaudinių spalvą. Tyrimui

tikslinga naudoti standartines popieriaus pramonės metodikas, jas praplečiant reikiamaiais atvejais.

2. Spaudinių savybes tikslinga lyginti su atitinkamų popierių savybėmis, tokiu būdu, galima būtų įžvelgti popierių ir spaudinių savybių kaitą spausdinant.
3. Nustatant spaudinių kaip kompozitinių medžiagų tamprumo rodiklius, tikslinga naudoti atvirkštinio inžinerinio uždavinio sprendimo koncepciją, t. y. pirmiau atliekant natūrinį eksperimentą, ir tik po to taikant esamus BE metodus, kombinuojant juos su genetiniais algoritmais, keičiami tamprumo rodikliai iki bus gaunami rezultatų sutapimai.

Spaudinių mechaninių ir spalvinių savybių tyrimai

Skyriuje pateikiamos ir analizuojamos spaudinių, gautų skirtingais spaudos būdais ant įvairių popieriaus rūšių, mechaninės ir spalvinės savybės. Ištirtos atspaudų tamprumo, deformacinės ir atsparumo savybės bei nustatyti popieriaus ir spaudinių tamprumo moduliai ir Puasono koeficientai, gauti sprendžiant atvirkštinį inžinerijos uždavinį ir naudojant spaudinių vibracines charakteristikas, nustatytas eksperimentiškai. Skyriaus tematika paskelbti devyni autorės straipsniai (Grigaliūnienė *et al.* 2015), (Ragauskas *et al.* 2015a), (Grigaliūnienė *et al.* 2014a), (Grigaliūnienė *et al.* 2014b), (Grigaliūnienė *et al.* 2014c), (Grigaliūnienė *et al.* 2014d), (Grigaliūnienė *et al.* 2013a), (Grigaliūnienė *et al.* 2013b), (Grigaliūnienė *et al.* 2013c).

3.1. Spaudinių mechaninės ir spalvinės savybės

Kompozicinės medžiagos sąvoką galima taikyti spaudiniams ant popieriaus. Charakteringas kompozicinės medžiagos bruožas yra tas, kad joje yra pagrindinis komponentas – matrica, kuri lemia pamatines medžiagos savybes, kurios kryptingai keičiamos kitų komponentų. Spaudinio matrica yra popierius, kurio

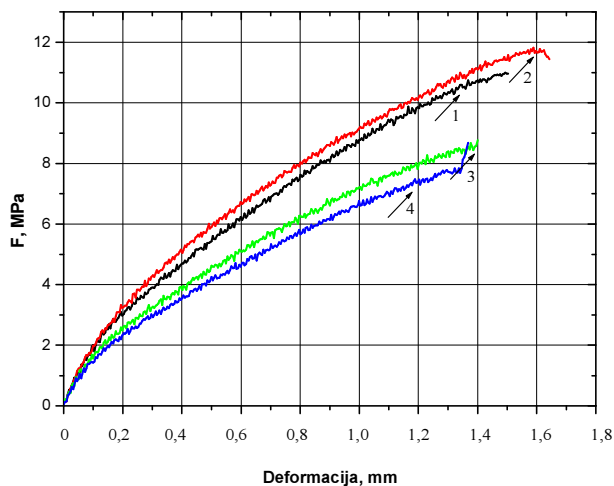
savybės gali kisti spausdinant. Fleksografinio, ofsetinio, rašalinės ir lazerinės spaudos procesų metu popieriaus paviršius dengiamas skirtingos sudėties vienu ar keliais dažų sluoksniais. Neretai atspaudai dengiami laku, kuris sudaro dar vieną atspaudą kaip kompozicinės medžiagos dedamąją. Dažai, o ypač esantys juose tirpikliai, kontaktuodami su popieriumi, įsiskverbia į popieriaus tūrį, ir keičia priklausomai nuo dažų savybių pamatines popieriaus savybes.

Spaudinio, kaip kompozicinės medžiagos, savybės pirmiausiai lemia pamatinė medžiaga – popierius. Popierius yra nevienalytė medžiaga, taip pat skiriasi jos išoriniai ir vidiniai sluoksniai, dažnai yra dangos. Priklausomai nuo kalandravimo režimų išoriniai sluoksniai gali būti puresni (mašininio kalandravimo popierius) arba tankesni (superkalandruotas popierius). Dažai pirmoje eilėje keičia paviršinius sluoksnius, juos gali susilpninti (supurenti) arba sustiprinti, pakeisti paviršiaus topologiją. Visa tai keičia pradinio popieriaus atitinkamas savybes. Todėl buvo ištirtos mechaninės ir spalvinės spaudinių savybės lyginant jas su popierių savybėmis.

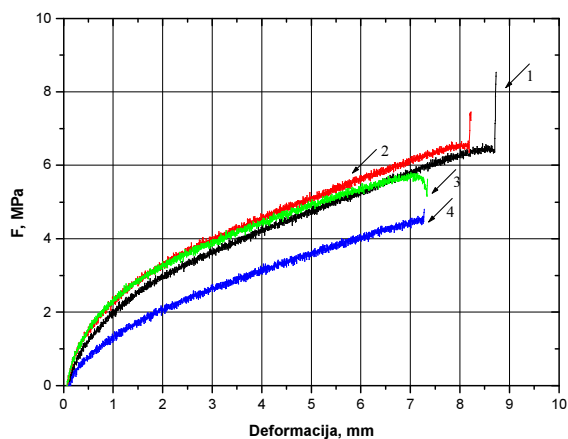
3.1.1. Spaudinių tamprumo savybės

Spausdinimo mašinose ir tolesnio spaudinių apdorojimo įrenginiuose iš pradžių popierius, vėliau popierius su vienu ar daugiau dažų sluoksniu yra tempiamas, gniuždomas, pjaustomas. Spausdinimo mašinose popierius, o po pirmos spausdinimo sekcijos – atspaudas yra tempiamas, ir tamprumo bei deformacijos savybės lemia ne tik spausdinimo mašinos darbą. Nuo jų priklauso spausdinimo kokybė ir, pirmiausiai, spalvų sutapdinimas, kuris turi būti geresnis kaip 0,1 mm.

Spausdinant svarbūs yra popieriaus ar popieriaus su dažais (spaudinio) tamprumo (Jungo) modulis, trūkio temptis, pailgėjimas tempiant ir Puasono koeficientas. Pastarasis yra retai matuojamas ir manoma, kad jo įtaka yra nedidelė. Tamprumo moduliui, o kartu ir trūkio įtempiui bei pailgėjimui nustatyti reikia matuoti įtempio priklausomybę nuo deformacijos tempiant. Tokios priklausomybės buvo nustatytos trimis tipiniams popieriams (nedengtas, kreidinis ir fotopopierius), ir rašaliniams bei lazeriniams atspaudams ant jų. Matavimai atlikti abiem popieriaus kryptims (išilginei ir skersinei) esant TAPPI normoje (TAPPI, 2006) numatytam tempimo greičiui – 5 mm/min. Įtempio priklausomybių nuo pailgėjimo deformacijos charakteringi pavyzdžiai pateikti 3.1–3.3 paveiksluose. Tamprumo modulio, pailgėjimo iki nutrūkstant bei trūkio įtempio verčių vidurkiai apibendrinti 3.1–3.3 lentelėse.



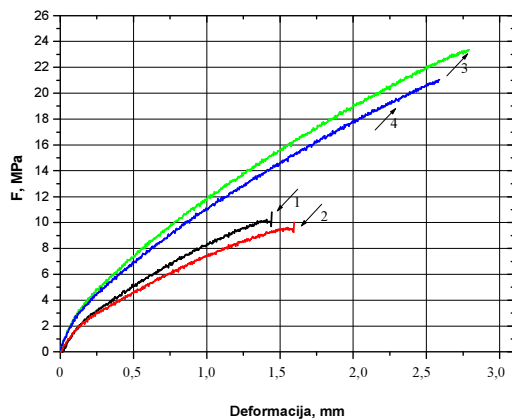
a)



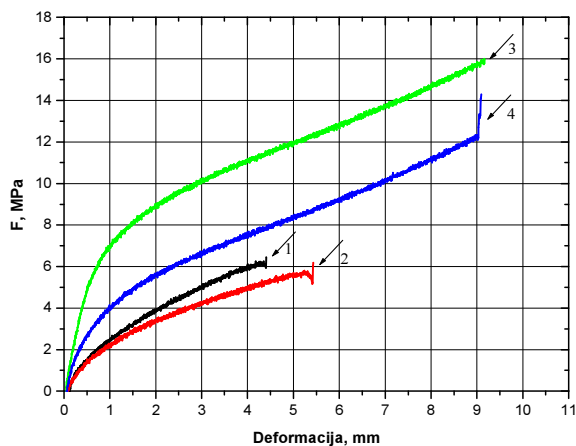
b)

3.1 pav. Nedengto popieriaus 4CC 100 g/m² įtempio priklausomybė (a – išilginė kryptis, b – skersinė kryptis) nuo deformacijos: 1 – popierius, 2 – lazerinė spauda K, 3 – rašalinė spauda K, 4 – rašalinė spauda CMYK

Fig. 3.1. Paper 4CC 100 g/m². Tensile stress (a – MD, b – CD) dependence on tensile deformation: 1 – paper, 2 – laser print K, 3 – ink-jet print K, 4 – ink-jet print CMYK



a)

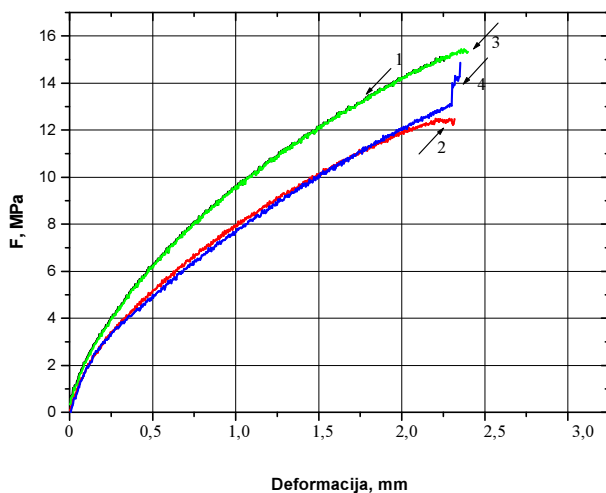


b)

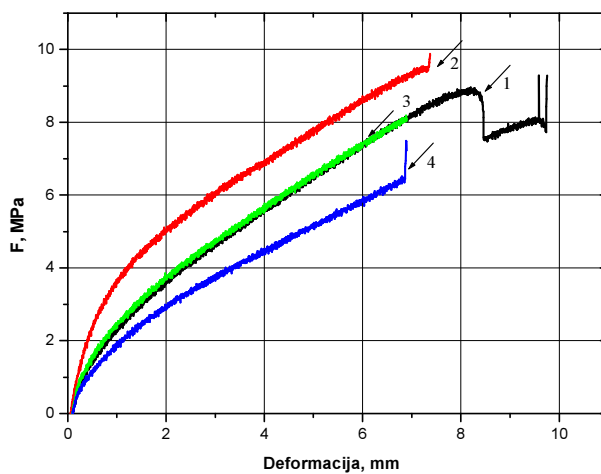
3.2 pav. Kreidinio popieriaus *Galerie art silk* 150 g/m² įtempio priklausomybė (a – išilginė kryptis, b – skersinė kryptis) nuo deformacijos:

1 – popierius, 2 – rašalinė spauda K, 3 – lazerinė spauda K,
4 – lazerinė spauda CMYK

Fig. 3.2. Paper *Galerie art silk* 150 g/m². Tensile stress (a – MD, b – CD) dependence on tensile deformation: 1 – paper, 2 – ink-jet print K, 3 – laser print K, 4 – laser print CMYK



a)



b)

3.3 pav. Foto popieriaus *Lomond* 130 g/m² įtempio priklausomybė (a – išilginė kryptis, b – skersinė kryptis) nuo deformacijos: 1 – popierius, 2 – rašalinė spauda K, 3 – lazerinė spauda K, 4 – lazerinė spauda CMYK

Fig. 3.3. Photo paper *Lomond* 130 g/m². Tensile stress (a – MD, b – CD) dependence on tensile deformation: 1 – paper, 2 – ink-jet print K, 3 – laser print K, 4 – laser print CMYK

3.1 lentelė. Popieriaus *4CC* 100 g/m² ir spaudinių tamprumo savybės (tempimo greitis – 5 mm/min)

Table 3.1. Paper *4CC* 100 g/m² and prints tension characteristics (tensile speed – 5 mm/min)

Spaudinys	Trūkio jėga, MPa		Pailgėjimas iki nutrūkstant, %		Jungo modulis, GPa	
	MD	CD	MD	CD	MD	CD
Popierius be dažų	10,97± 1,05	8,53± 1,75	1,18± 0,18	6,59± 0,35	3,84± 1,26	0,53± 0,29
Rašaliniai spaudiniai (100% K)	8,76± 1,80	5,62± 1,70	1,20± 0,14	5,45± 0,38	1,93± 0,52	0,28± 0,21
Rašaliniai spaudiniai (100% CMYK)	8,68± 0,74	4,80± 0,36	1,14± 0,18	5,98± 0,22	1,64± 0,17	0,14± 0,05
Lazeriniai spaudiniai (100%K)	11,44± 0,99	7,45± 1,22	2,16± 0,19	6,44± 0,42	3,17± 0,76	0,78± 0,23
Lazeriniai spaudiniai (100% CMYK)	10,76± 1,04	7,09± 0,54	1,87± 0,15	6,77± 0,33	3,02± 0,66	0,61± 0,09

3.2 lentelė. Popieriaus *Galerie art silk* 150 g/m² ir atspaudų tamprumo savybės (tempimo greitis – 5 mm/min)

Table 3.2. Paper *Galerie art silk* 150 g/m² and prints tension characteristics (tensile speed – 5 mm/min)

Spaudinys	Trūkio jėga, MPa		Pailgėjimas iki nutrūkstant, %		Jungo modulis, GPa	
	MD	CD	MD	CD	MD	CD
Popierius be dažų	10,80± 1,44	6,44±0, 46	1,21± 0,13	3,27± 0,15	3,97± 0,93	0,59± 0,52
Rašaliniai spaudiniai (100% K)	10,01± 0,72	6,19± 1,36	1,33± 0,10	3,77± 0,39	2,55± 0,89	0,44± 0,27
Rašaliniai spaudiniai (100% CMYK)	9,65± 1,22	5,23± 0,65	1,26± 0,11	3,95± 0,18	2,18± 0,96	0,25± 0,23

3.2 lentelės pabaiga

Spaudinys	Trūkio jėga, MPa		Pailgėjimas iki nutrūkstant, %		Jungo modulis, GPa	
	MD	CD	MD	CD	MD	CD
Lazeriniai spaudiniai (100%K)	23,37± 1,32	15,78± 0,39	2,30± 0,51	8,85± 0,27	5,63± 1,14	1,10± 0,13
Lazeriniai spaudiniai (100% CMYK)	21,04± 1,35	14,30± 0,43	2,13± 0,67	9,22± 0,14	5,15± 0,88	0,66± 0,12

3.3 lentelė. Popieriaus *Lomond* 130 g/m² ir atspaudų tamprumo savybės (tempimo greitis – 5 mm/min)

Table 3.3. Paper *Lomond* 130 g/m² and prints tension characteristics (tensile speed – 5 mm/min)

Spaudinys	Trūkio jėga, MPa		Pailgėjimas iki nutrūkstant, %		Jungo modulis, GPa	
	MD	CD	MD	CD	MD	CD
Popierius be dažų	14,59± 2,53	9,29± 1,26	2,20± 0,15	7,64± 0,09	3,81± 0,84	0,42± 0,28
Rašaliniai spaudiniai (100% K)	12,47± 2,23	9,88± 2,42	1,88± 0,23	6,19± 0,43	2,40± 0,85	0,68± 0,43
Rašaliniai spaudiniai (100% CMYK)	12,06± 2,12	9,74± 1,09	1,80± 0,12	6,98± 0,25	2,12± 0,67	0,32± 0,33
Lazeriniai spaudiniai (100%K)	15,33± 4,13	8,11± 0,52	2,08± 0,19	7,30± 0,36	3,43± 1,40	0,30± 0,05
Lazeriniai spaudiniai (100% CMYK)	14,87± 3,17	7,23± 0,63	2,01± 0,24	7,66± 0,58	3,23± 1,23	0,17± 0,17

Pateikti rezultatai rodo, kad, nors dažų („tonerio“ lazerinėje spaudoje) sluoksnis ant spaudinių lyginant su popieriaus storiu (100–150 μm) yra plonas (rašalinėje spaudoje 1–2 μm, lazerinėje – apie 5–7 μm), stebima pakankamai aiški tamprumo savybių kaita. Galima buvo daryti prielaidą, kad dažų sluoksnis didins popieriaus stiprumą. Tačiau matavimų rezultatai rodo, kad tas poveikis

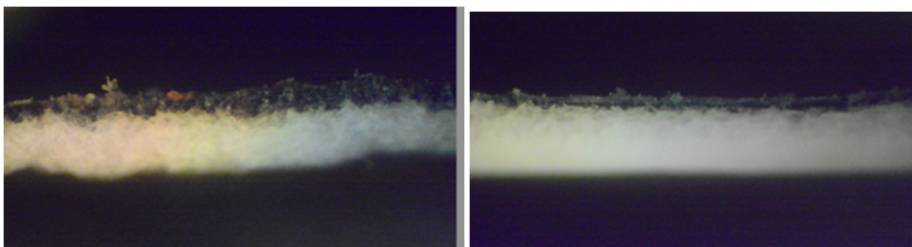
priklauso nuo to, iš kokių dažų sudarytas sausų dažų sluoksnis ir koks buvo popierius – pagrindas.

Nagrinėtų šiame poskyryje popierių tamprumo moduliai išilgine kryptimi skiriasi nedaug (iš esmės paklaidų ribose) – nuo 3,81 iki 3,97 MPa. Skersine kryptimi tamprumo modulis skiriasi daugiau – nuo 0,42 iki 0,59 MPa. Nepaisant to, jų ortotropiškumas (modulių abiem kryptimis santykis) skiriasi palyginus nedaug – nuo 6,7 iki 9,0.

Dažų sluoksnis, priklausomai nuo popieriaus ir nuo popieriaus liejimo krypties, keičia tamprumo modulį tam pačiam popieriui nevienodai. Rašalinių spaudinių ant nekreidinio popieriaus tamprumo modulis mažėja beveik du kartus ir maždaug vienodai abiem kryptimis, ir todėl ortotropiškumas nekinta. Lazerinių spaudinių ant to paties popieriaus tamprumo modulis išilgine kryptimi šiek tiek mažėja (nuo 3,84 iki 3,17 MPa), o skersine – didėja nuo 0,53 iki 0,78 MPa. Dėl to ortotropiškumas ženklai sumažėja – nuo 7,2 iki maždaug 4.

Rašalinių spaudinių ant kreidinio popieriaus tamprumo charakteristikos lyginant su nedengtu popieriumi keičiasi panašiai, tačiau modulių vertės mažėjimas yra mažesnis. Lazerinių spaudinių ant kreidinio popieriaus tamprumo moduliai padidėja maždaug 1,5–2 kartus. Daugiau didėja skersinės krypties modulis, kas lemia ženklų ortotropiškumo sumažėjimą nuo 6,7 iki maždaug 5 (lazerinis K). Rašalinių spaudinių ant fotopopieriaus tamprumo moduliai mažėja panašiai, kaip ir kreidinio popieriaus atveju, tačiau lazerinių spaudinių – skirtingai nuo kreidinio šiek tiek mažėja. Apibendrinant spaudinių tamprumo modulio tyrimo rezultatus, reikia pažymėti, kad dažų sluoksnis keičia spaudinio ortotropiškumą. Pokyčiai priklauso nuo popieriaus (kreidinis, nekreidinis) ir nuo spaudos būdo. Plono fleksografinių ir rašalinių spaudinių dažų sluoksnio įtaka yra nedidelė, ypač spaudinių ant kreidinio ir fotopopieriaus, kurių sąveika su dažais yra silpna. Daug didesnę įtaką ortotropiškumui turi lazerinių spaudinių dažų sluoksnis dėl ženkliai didesnio storio ir dėl to, kad nesant juose vandens nesikeičia pats popierius – pagrindas. Į nustatytus dėsningumus reikėtų atsižvelgti projektuojant galutinio produkto gamybos technologiją, pavyzdžiui, nustatant spaudinio lankstymo kryptį. Trūkio tempiant įtempio kaita spausdinant ant nekreidinio ir fotopopieriaus iš esmės nekoreliuoja su tamprumo modulio kaita, nors tam tikras ryšis yra – rašalinių spaudinių trūkio įtempis yra mažesnis už popieriaus, bet kiekybinės koreliacijos nėra. Lazerinių spaudinių trūkio įtempis visada yra didesnis už popieriaus, o kreidinio popieriaus atveju padidėjimas yra apie 2 kartus. Stebėta tamprumo modulio ir trūkio įtempio kaita spausdinant gali būti paaiškinta skirtinga dažų sąveika su popieriumi. Rašalinės spaudos dažuose yra daug vandens (iki 50%). Spausdinant vanduo įsigeria į popierių ir pakeičia jo struktūrą – supurena jį, taip mažindamas jo stiprį. Efektas yra ryškesnis nekreidiniam popieriui (3.4 pav.). Lazerinėje spaudoje „toneryje“ nėra vandens,

jis sukimba su popieriumi išlydytas, ir jo poveikis popieriui yra kitoks. Be to, išlydytas sluoksnis yra storesnis, ir tai lemia stiprumo padidėjimą.



a)

b)

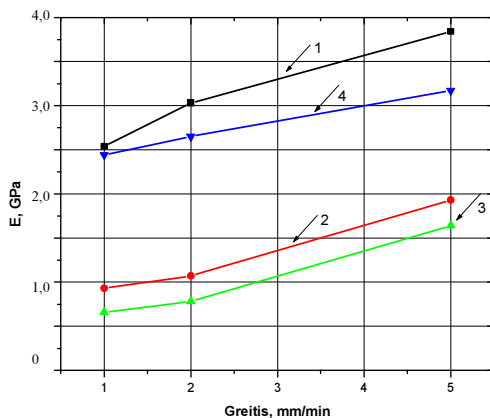
3.4 pav. Rašalinių spaudinių (100% CMYK) skerspjūvis. Popierius:

a) – 4CC 100 g/m², b) – *Galerie art silk* 150 g/m². Didinimas 40^x

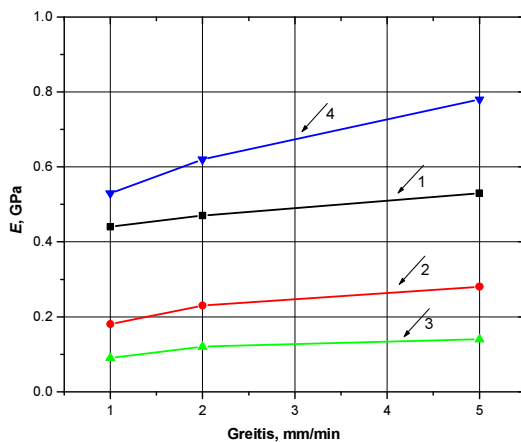
Fig. 3.4. Cross section of ink-jet print (100% CMYK). Paper:

a) – 4CC 100 g/m², b) – *Galerie art silk* 150 g/m². Magnitude 40^x

Pailgėjimo iki nutrūkstant deformacija taip pat keičiasi spausdinant 3.1–3.3 lentelės. Rašaliniai spaudiniai, kaip taisyklė, nutrūksta anksčiau, o lazeriniai spaudiniai atlaiko didesnę pailgėjimą. Popieriaus ir spaudinių įtempio tempiant priklausomybėje praktiškai nėra tiesinės dalies (3.1–3.2 pav.). Taip yra dėl to, kad popieriaus ir spaudinių deformacija yra tąsaus tamprumo pobūdžio. Tokia deformacija, palyginus su tampriąja, vystosi lėtai. Šiuo atveju tamprumo modulis, nustatomas pagal pradinę įtempio priklausomybės nuo deformacijos dalį, priklauso nuo deformacijos greičio. 3.5–3.7 paveiksluose pateiktos nekreidinio, kreidinio ir fotopopieriaus ir spaudinių ant jų tamprumo modulio priklausomybės nuo deformacijos greičio. Visais atvejais tamprumo modulis didėja, didėjant deformacijos greičiui. Modulio didėjimo eiga yra maždaug ta pati tiek popieriui, tiek rašaliniams ir lazeriniams spaudiniams. Tačiau tas didėjimas absoliučia verte yra nevienodas. Popierių *4CC* ir *Galerie art silk* atvejais, didėjant tempimo greičiui nuo 1,0 iki 5,0 mm/min, tamprumo modulis kaip popieriui, taip ir spaudiniams padidėja 1,5–2 kartus. Fotopopieriaus atveju tas padidėjimas siekia 3–4 kartus. Šie rezultatai (popieriaus ir spaudinių modulio didėjimo eigos panašumas) rodo, kad, nors spausdinimas pastebimai keičia spaudinių tamprumo savybes, popieriaus – pagrindo vaidmuo yra pagrindinis.



a)



b)

3.5 pav. Popieriaus 4CC 100 g/m² tamprumo modulio priklausomybė

(a – išilginė kryptis, b – skersinė kryptis) nuo deformacijos greičio:

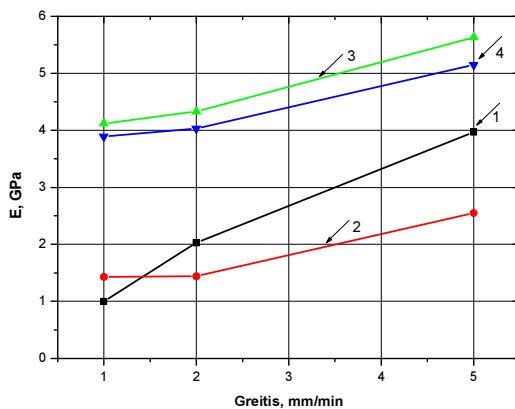
1 – popierius, 2 – lazerinė spauda K, 3 – rašalinė spauda K,

4 – rašalinė spauda CMYK

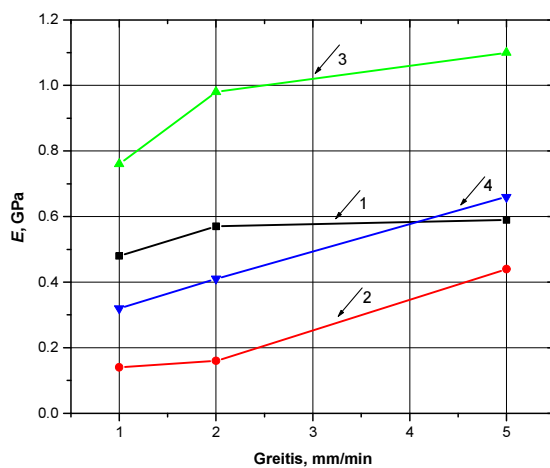
Fig. 3.5. Paper 4CC 100 g/m² elasticity modulus dependence

(a – MD, b – CD) on the deformation speed: 1 – paper, 2 – laser print K,

3 – ink-jet print K, 4 – inkjet print CMYK



a)



b)

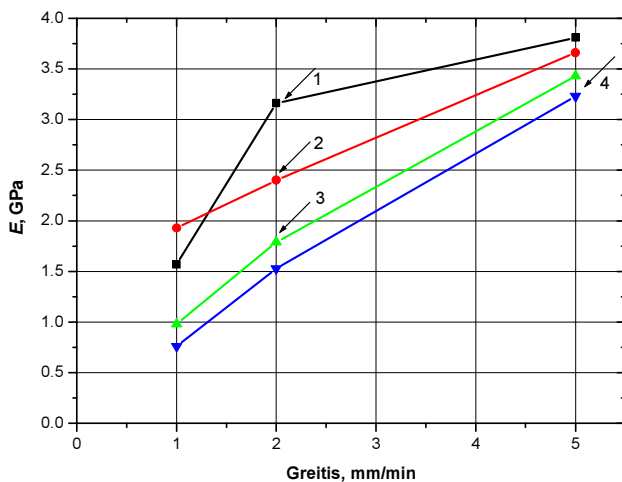
3.6 pav. Popieriaus *Galerie art silk* tamprumo modulio priklausomybė

(a – išilginė kryptis, b – skersinė kryptis) nuo deformacijos greičio:

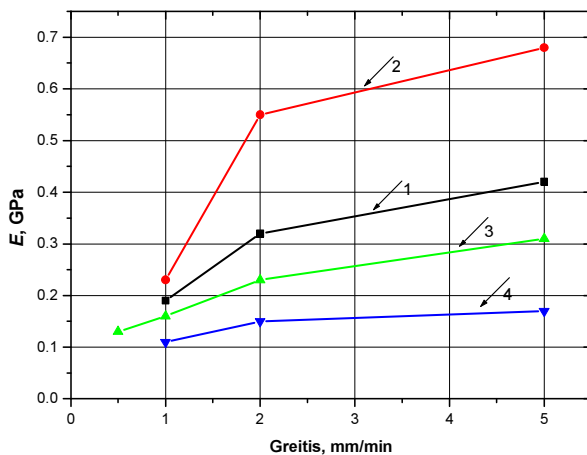
1 – popierius, 2 – rašalinė spauda K, 3 – lazerinė spauda K,

4 – lazerinė spauda CMYK

Fig. 3.6. Paper *Galerie art silk* elasticity modulus dependence (a – MD, b – CD) on the deformation speed: 1 – paper, 2 – ink-jet print K, 3 – laser print K, 4 – laser print CMYK



a)



b)

3.7 pav. Fotopopieriaus tamprumo modulio priklausomybė
(a – išilginė kryptis, b – skersinė kryptis) nuo deformacijos greičio:
1 – popierius, 2 – rašalinė spauda K, 3 – lazerinė spauda K,
4 – lazerinė spauda CMYK

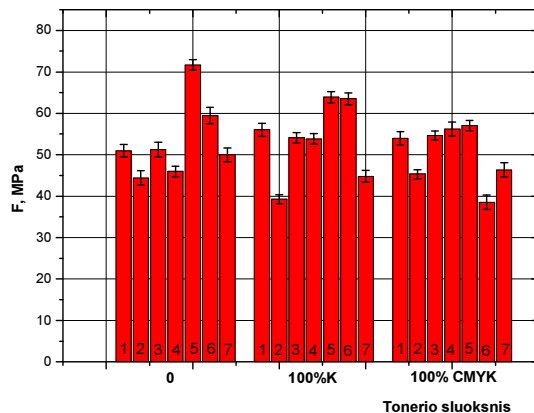
Fig. 3.7. Photopaper elasticity modulus dependence (a – MD, b – CD) on the deformation speed: 1 – paper, 2 – ink-jet print K, 3 – laser print K, 4 – laser print CMYK

3.1.2. Spaudinių atsparumas tempimui

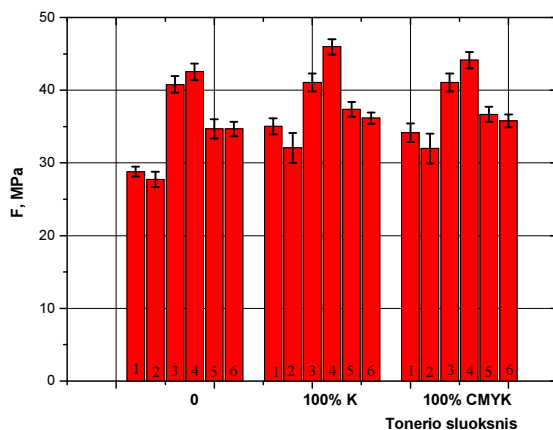
Popierių ir spaudinių trūkio tempiant įtempis. Popierių atsparumas tempimui dažniausiai yra nusakomas trūkio įtempio kartu nustatant pailgėjimą iki nutrūkstant. Standartuose (ISO 1924-1:1992(E), Tappi, 2006) trūkio įtempis yra nustatomas, esant nustatytam tempimo greičiui. Tappi norma nustato 5 mm/min tempimo greitį, o ISO 1924 – 100 mm/min. Spaudinių atsparumo savybes pagrindinai lemia popierius, kurio savybės Europoje matuojamos pagal ISO standartus. Todėl tikslinga ištirti spaudinių atsparumo savybes tuo pačiu režimu, kaip ir popieriaus. Buvo tirti nedengti popieriai (*4CC*, *Maxi offset*), kreidiniai (*Galerie art silk* 150 ir 300 g/m², *Digigreen* 150 ir 300 g/m²), ir fotografinis popierius *Lomond* bei spaudiniai ant jų. Popieriaus ir spaudinių atsparumo tempimui rezultatai pateikiami (3.8–3.14 pav.).

Dažų sluoksnis ant popieriaus daro įtaką spaudinių atsparumui, tačiau pokyčiai priklauso nuo spaudos būdo, tiksliau nuo naudojamų dažų. Kaip ir tikėtasi, visų spaudinių atsparumas tempimui išilgine (popieriaus liejimo) kryptimi yra didesnis už atsparumą skersine kryptimi, tačiau dažų įtaka ne visada yra vienoda abiem kryptim. Rašalinių spaudinių trūkio įtempis yra maždaug toks pats, kaip ir atitinkamų popierių. Kaita yra nedidelė ir kokio tai aiškaus dėsningumo nustatyti nepavyksta: abiem popieriaus liejimo kryptimis vienais atvejais atsparumas tempimui šiek tiek didėja, kitais – šiek tiek mažėja. Pavyzdžiui, spaudinių ant popieriaus *4CC* trūkio įtempis praktiškai nekinta (3.8 pav., popierius 2). Tai ne visai sutampa su matavimo rezultatais, gautais matuojant mažesniu tempimo greičiu, kada buvo stebėtas trūkio jėgos mažėjimas. Galima manyti, kad matavimas mažesniu tempimo greičiu yra tikslesnis, ir tai leidžia pamatyti mažesnius pokyčius. Panašūs rezultatai gauti ir spaudiniams ant popieriaus *Galerie art silk* (3.8, popierius 3). Aiškesni rezultatai gauti spaudiniams ant fotografinio popieriaus *Lomond*: dengimas rašalu mažina atsparumą tempimui, kas ryškiau matosi matuojant skersine kryptimi (3.8 pav., popierius 7). Pastarasis rezultatas atitinka rezultatus, gautus matuojant mažu tempimo greičiu. Apibendrinant galima teigti, kad, nepaisant rezultatų sklaidos, rašalinių spaudinių atsparumas yra mažesnis už atitinkamo popieriaus atsparumą tempimui. Atskirai reikia pažymėti, kad trūkio įtempis, matuojant didesniu tempimo greičiu, yra kelis kartus didesnis, nei matuojant mažu greičiu, kas koreliuoja su tamprumo modulio didėjimu didėjant tempimo greičiui.

Fleksografiniai spaudiniai buvo tirti ant popierių ir papildomai ant kartonų (storų popierių), iš kurių dažnai gaminamos pakuotės. Visais atvejais spaudinių trūkio įtempis yra didesnis už atitinkamo popieriaus trūkio įtempį (3.9 pav.), ir padidėjimas siekia per 100 % (3.4 lentelė). Trūkio įtempio padidėjimas yra skirtingas abiem liejimo kryptimis, tačiau aiškaus dėsningumo nustatyti nepavyko.



a)



b)

3.8 pav. Popieriaus ir rašalinių spaudinių trūkio įtempis tempiant:

a) išilgine kryptimi, b) skersine kryptimi. Popierius: 1 – *Maxi offset*

100 g/m², 2 – *4CC* 100 g/m², 3 – *Galerie art silk* 150 g/m²,

4 – *Galerie art silk* 300 g/m², 5 – *Digigreen* 150 g/m²,

6 – *Digigreen* 300 g/m², 7 – *Lomond* 130 g/m²

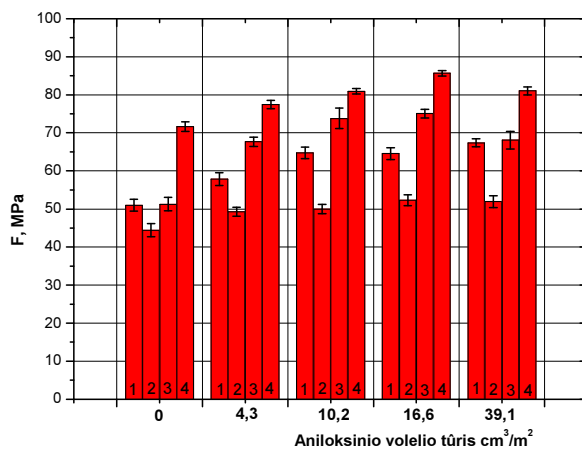
Fig. 3.8. Breaking stress of paper and ink-jet prints: a) machine direction,

b) cross direction. Papers: 1 – *Maxi offset* 100 g/m², 2 – *4CC* 100 g/m²,

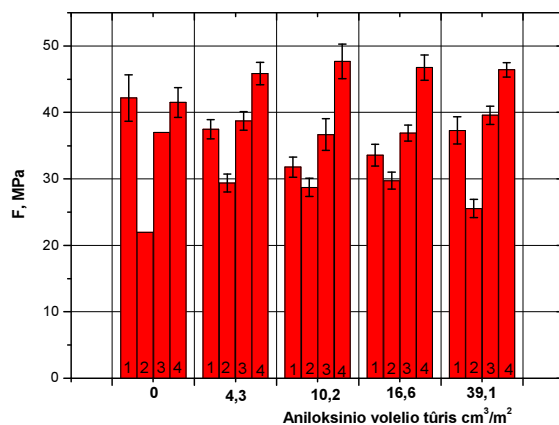
3 – *Galerie art silk* 150 g/m², 4 – *Galerie art silk* 300 g/m²,

5 – *Digigreen* 150 g/m², 6 – *Digigreen* 300 g/m²,

7 – *Lomond* 130 g/m²



a)



b)

3.9 pav. Popieriaus ir fleksografinių spaudinių trūkio įtempis tempiant:

a) išilgine kryptimi, b) skersine kryptimi. Popierius:

1 – *Maxi offset* 100 g/m², 2 – *4CC* 100 g/m²,

3 – *Galerie art silk* 150 g/m², 4 – *Digigreen* 150 g/m²

Fig. 3.9. Breaking stress of paper and flexographic prints: a) machine

direction, b) cross direction. Papers:

1 – *Maxi offset* 100 g/m², 2 – *4CC* 100 g/m²,

3 – *Galerie art silk* 150 g/m², 4 – *Digigreen* 150 g/m²

3.4. lentelė. Fleksografinių spaudinių trūkio įtempio padidėjimas**Table 3.4.** The increase of breaking stress of flexographic prints

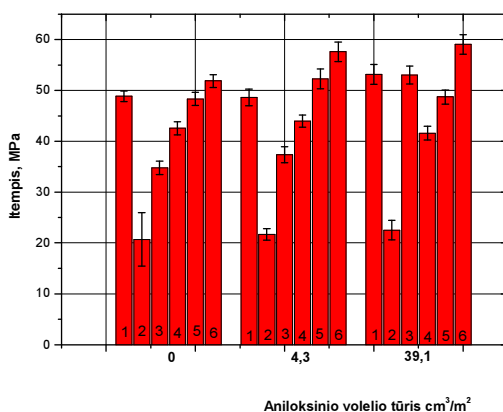
Popierius	Trūkio įtempio padidėjimas, %							
	Volelio paviršinis tūris 4,3 cm ³ /m ²		Volelio paviršinis tūris 10,2 cm ³ /m ²		Volelio paviršinis tūris 16,6 cm ³ /m ²		Volelio paviršinis tūris 39,1 cm ³ /m ²	
	Išilg. krypt.	Skers. krypt.	Išilg. krypt.	Skers. krypt.	Išilg. krypt.	Skers. krypt.	Išilg. krypt.	Skers. krypt.
<i>Maxi offset</i> 100 g/m ²	34	28	50	9	49	15	56	28
<i>4CC</i> 100 g/m ²	14	31	16	28	8	33	7	14
<i>Galerie art Silk</i> 150 g/m ²	10	25	20	18	22	19	11	28
<i>Digigreen</i> 150 g/m ²	122	66	132	71	145	68	132	67

Spaudinių ant kartonų trūkio įtempis dažniausiai taip pat didėja, bet padidėjimas yra mažesnis (3.5 lentelė) arba paklaidų ribose lieka nepakitęs (3.10 pav.). Atsparumas tempimui skersine kryptimi didėja daugiau, lyginant su išilgine kryptimi (3.11 pav.).

3.5. lentelė. Fleksografinių spaudinių ant kartonų trūkio įtempio padidėjimas**Table 3.5.** The increase of breaking stress of flexographic prints on boards

Kartonas/popierius	Trūkio įtempio padidėjimas, %			
	Volelio paviršinis tūris 4,3 cm ³ /m ²		Volelio paviršinis tūris 39,1 cm ³ /m ²	
	Išilginė kryptis	Skersinė kryptis	Išilginė kryptis	Skersinė kryptis
<i>Arktika</i> 275 g/m ²	2	-1	13	9
<i>Carta Solida</i> 320 g/m ²	-12	5	-13	9
<i>Galerie art silk</i> 300 g/m ²	5	7	5	52
<i>4CC</i> 200 g/m ²	1	3	0.2	-2
<i>Arktika</i> 300 g/m ²	23	8	2	0.8
<i>Invercote Creato</i> 300 g/m ²	1	11	1	14

Fleksografiniuose dažuose yra tam tikras kiekis vandens su nedideliu kiekiu alkoholio (5–10 %). Galima buvo tikėtis, kad vanduo mažina paviršinių popierių stiprumą ir spaudinių atsparumas tempimui turėtų mažėti. Tačiau gauti rezultatai rodo, kad atspaudų trūkio įtempis yra didesnis už atitinkamo popieriaus ir atsparumas tempimui didėja, didinant dažų sluoksnio storį. Šį efektą galima paaiškinti tuo, kad dažų rišiklis sutvirtina viršutinį popieriaus sluoksnį. Tai ne tik kompensuoja vandens silpninantį poveikį, bet ir jį viršija. Tai, kad spaudinių ant kartonų trūkio įtempių pokytis santykinai mažesnis už popierių trūkio įtempio padidėjimą, patvirtina šią prielaidą – storesniam pagrindui paviršiaus įtaka yra mažesnė. Rašalinio spausdinimo rašalas ir fleksografiniai dažai pagal naudojamus tirpiklius yra panašūs – abiejuose yra vandens. Tačiau jų įtaka spaudinių tempimo atsparumui yra skirtinga: rašalinių spaudinių stiprumas mažėja (nors ir nedaug), o fleksografinių – pastebimai didėja. Tai galima aiškinti tuo, kad fleksografiniuose dažuose yra mažiau vandens ir naudojamas kitas, geriau sujungiantis popieriaus dedamąsias ir stipresnis rišiklis.



3.10 pav. Kartonų ir fleksografinių spaudinių trūkio įtempis tempiant

(išilginė kryptis). Popierius: 1 – *Arktika* 275 g/m²,

2 – *Carta Solida* 320 g/m², 3 – *Galerie art silk* 300 g/m²,

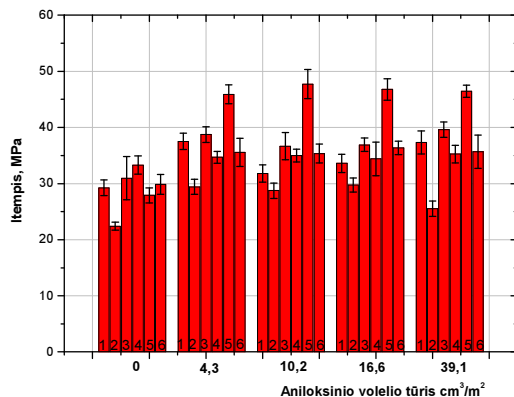
4 – *4CC* 200 g/m², 5 – *Arktika* 300 g/m², 6 – *Invercote Creado* 300 g/m²

Fig. 3.10. Breaking stress of paper and flexographic prints

(machine direction. Papers: 1 – *Arktika* 275 g/m²,

2 – *Carta Solida* 320 g/m², 3 – *Galerie art silk* 300 g/m², 4 – *4CC* 200 g/m²,

5 – *Arktika* 300 g/m², 6 – *Invercote Creado* 300 g/m²

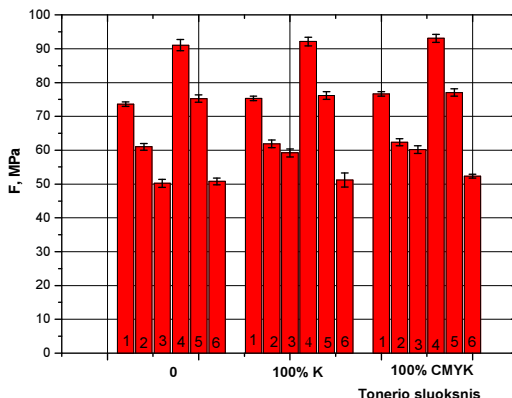


3.11 pav. Kartonų ir fleksografinių spaudinių trūkio įtempis tempiant (skersine kryptimi). Popierius: 1 – *Arktika* 275 g/m^2 , 2 – *Carta Solida* 320 g/m^2 , 3 – *Galerie art silk* 300 g/m^2 , 4 – *4CC* 200 g/m^2 , 5 – *Arktika* 300 g/m^2 , 6 – *Invercote Createo* 300 g/m^2
Fig. 3.11. Breaking stress of paper and flexographic prints (cross direction).
 Papers: 1 – *Arktika* 275 g/m^2 , 2 – *Carta Solida* 320 g/m^2 , 3 – *Galerie art silk* 300 g/m^2 , 4 – *4CC* 200 g/m^2 , 5 – *Arktika* 300 g/m^2 , 6 – *Invercote Createo* 300 g/m^2

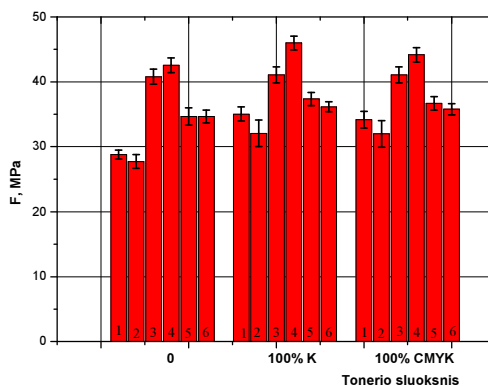
Lazerinių spaudinių atsparumas tempimui išilgine kryptimi lyginant su popieriumi keičiasi nedaug – stebimas nedidelis padidėjimas (3.12 pav.) ir nepriklausomai nuo to, ar yra vienas „tonerio“ sluoksnis, ar keturi. Skersine kryptimi atsparumas tempimui didėja daug daugiau (3.12a pav.) ir spaudinys yra daugiau izotropiškas. Šie rezultatai nesutampa su rezultatais, gautais tempiant mažu greičiu (3.1.1 skyrelis). Šis skirtumas sietinas su tuo, kad „tonerio“ sluoksnis yra trapesnis (pagrindinė medžiaga yra polistireno kopolimeras) už kitų dažų, ir, tempiant lėtai, toks sluoksnis ilgiau tempiasi netrūkdamas.

Ofsetinių spaudinių trūkio įtempio vertės, lyginant su popieriumi pateikiamos 3.13–3.14 paveiksluose. Duomenų analizė rodo, kad atsparumas tempimui vienais atvejais kiek tai didėja, kitais – kiek tai mažėja. Tie pokyčiai mažai priklauso nuo dažų sluoksnio storio ir dažuose esančio pigmento (spalvos). Toks rezultatas gali būti sietinas su ofsetinių dažų rišiklio tamprumo charakteristikomis, kurios mažai skiriasi nuo popieriaus charakteristikų arba net yra mažesnės. Toks rezultatas gali būti sietinas su ofsetinių dažų rišiklio tamprumo charakteristikomis, kurios mažai skiriasi nuo popieriaus charakteristikų arba net yra mažesnės. Tada ir plonas naudojamas ofsetinėje spaudoje dažų sluoksnis nedaro aiškiai pastebimos įtakos. Nors šią hipotezę netiesiogiai patvirtina trūkio įtempio

nepriklausymas nuo dažų spalvos (skirtingi pigmentai), tačiau jai patvirtinti reikia detalesnio tyrimo su skirtingų rišiklių dažais, pavyzdžiui, su ultravioletine spinduliuote arba elektronų spinduliu kietinamais dažais (UV ar EB dažai).

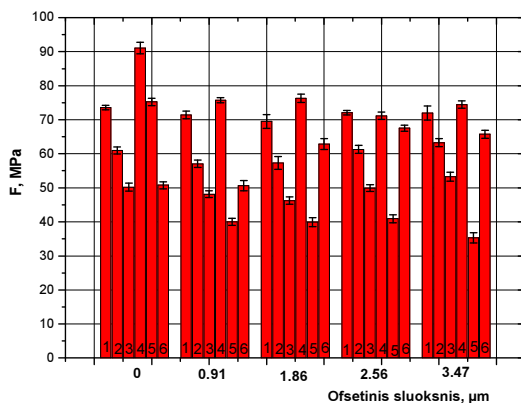


a)

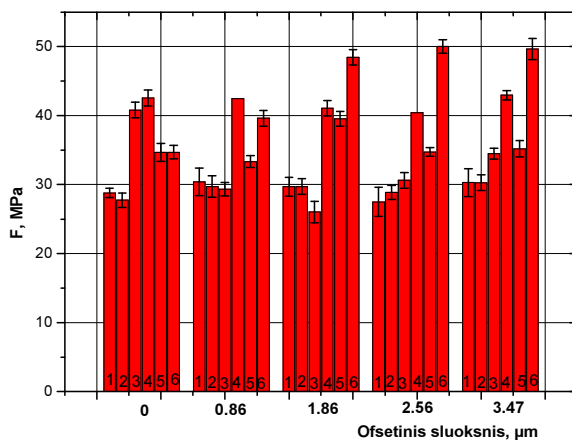


b)

3.12 pav. Popieriaus ir lazerinių spaudinių trūkio įtempis tempiant:
a) išilginė kryptis, b) skersinė kryptis. Popierius: 1 – *Maxi offset* 80 g/m²,
2 – *Maxi offset* 150 g/m², 3 – *4CC* 100 g/m², 4 – *4CC* 200 g/m²,
5 – *Galerie art silk* 150 g/m², 6 – *Galerie art silk* 300 g/m²
Fig. 3.12. Breaking stress of paper and laser prints: a) machine direction,
b) cross direction. Papers: 1 – *Maxi offset* 80 g/m²,
2 – *Maxi offset* 150 g/m², 3 – *4CC* 100 g/m², 4 – *4CC* 200 g/m²,
5 – *Galerie art silk* 150 g/m², 6 – *Galerie art silk* 300 g/m²



a)



b)

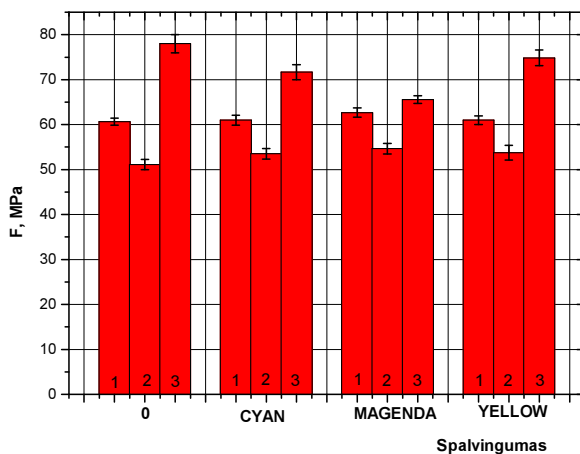
3.13 pav. Popieriaus ir ofsetinių spaudinių trūkio įtempis tempiant:

a) išilginė kryptis, b) skersinė kryptis. Popierius: 1 – *Maxi offset* 80 g/m²,

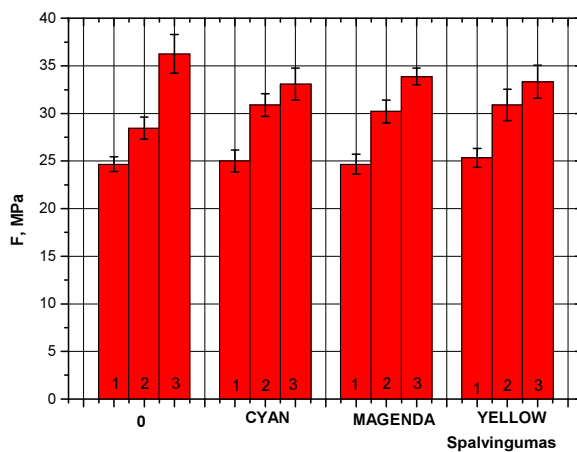
2 – *Maxi offset* 150 g/m², 3 – *4CC* 100 g/m², 4 – *4CC* 200 g/m²,

5 – *Galerie art silk* 150 g/m², 6 – *Galerie art silk* 300 g/m²

Fig. 3.13. Breaking stress of paper and offset prints: a) machine direction, b) cross direction. Papers: 1 - *Maxi offset* 80 g/m², 2 – *Maxi offset* 150 g/m², 3 – *4CC* 100 g/m², 4 – *4CC* 200 g/m², 5 – *Galerie art silk* 150 g/m², 6 – *Galerie art silk* 300 g/m²



a)



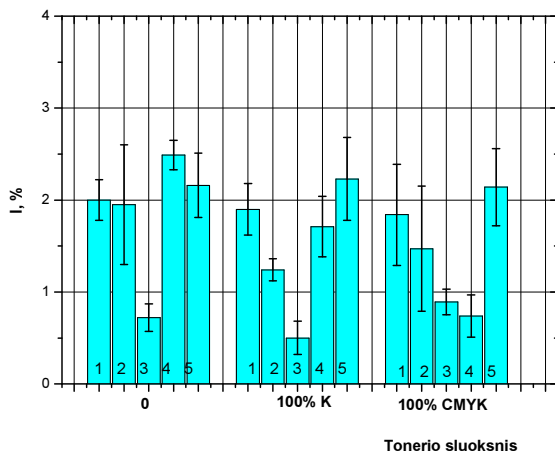
b)

3.14 pav. Popieriaus ir ofsetinių spaudinių (skirtingi dažai) trūkio įtempis tempiant: a) išilginę kryptį, b) skersinę kryptį. Popierius:

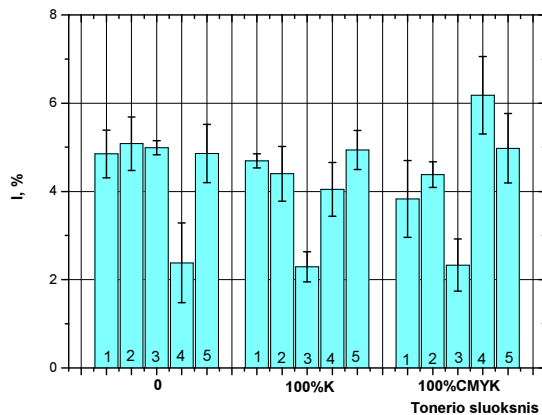
1 – *Maxi offset* 80 g/m², 2 – *4CC* 100 g/m², 3 – *Galerie art silk* 150 g/m²

Fig. 3.14. Break stress of paper and lithographic prints (different inks): a) machine direction, b) cross direction. Papers: 1 – *Maxi offset* 80 g/m², 2 – *4CC* 100 g/m², 3 – *Galerie art silk* 150 g/m²

Pailgėjimas tempiant iki nutrūkstant. Popieriaus ir spaudinių deformacija (pailgėjimas) dažnai lemia spaudinių kokybę – spalvų sutapdinimą. Paprastai yra nustatomas pailgėjimas iki nutrūkstant (toliau – pailgėjimas). Popierių ir spaudinių tyrimo rezultatai parodė, kad dažų sluoksnis keičia pailgėjimo tempiant dydį. Kai kurie rezultatai pateikiami 3.15–3.16 pav.



a)



b)

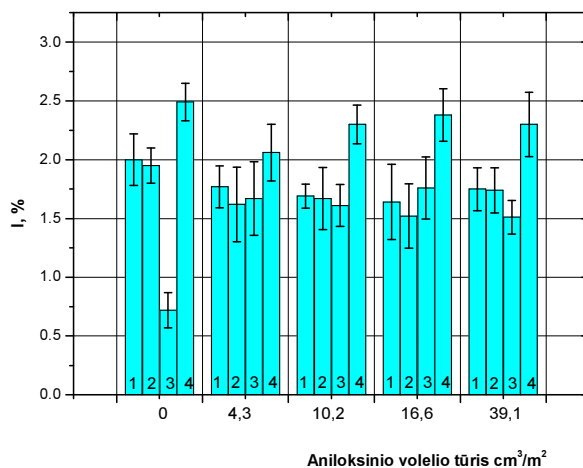
3.15 pav. Popieriaus ir rašalinių spaudinių pailgėjimas tempiant:

a) išilgine kryptimi, b) skersine kryptimi. Popierius:

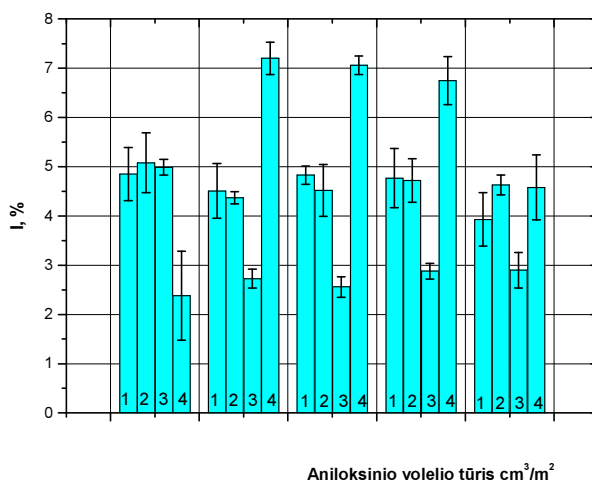
1 – Maxi offset 100 g/m², 2 – 4CC 100 g/m², 3 – Galerie art silk 150 g/m²,
4 – Digigreen 150 g/m²; 5 – Lomond 130 g/m²

Fig. 3.15. Tensile elongation of paper and inkjet prints:

a) machine direction; b) cross direction. Paper: 1 – Maxi offset 100 g/m²;
2 – 4CC 100 g/m², 3 – Galerie art silk 150 g/m², 4 – Digigreen 150 g/m²,
5 – Lomond 130 g/m²



a)



b)

3.16 pav. Popieriaus ir fleksografinių spaudinių pailgėjimas tempiant:

a) išilgine kryptimi, b) skersine kryptimi. Popierius:

1 – *Maxi offset* 100 g/m², 2 – *4CC* 100 g/m², 3 – *Galerie art silk* 150 g/m²,
4 – *Digigreen* 150 g/m²

Fig. 3.16. Tensile elongation of paper and flexographic prints:

a) machine direction, b) cross direction. Paper: 1 – *Maxi offset* 100 g/m²,
2 – *4CC* 100 g/m², 3 – *Galerie art silk* 150 g/m², 4 – *Digigreen* 150 g/m²

Nors duomenų sklaida yra gana didelė, tačiau yra tam tikras pailgėjimo dydžio ryšys su trūkio tempiant įtempiu – trūkio įtempio padidėjimas lemia mažesnę pailgėjimą.

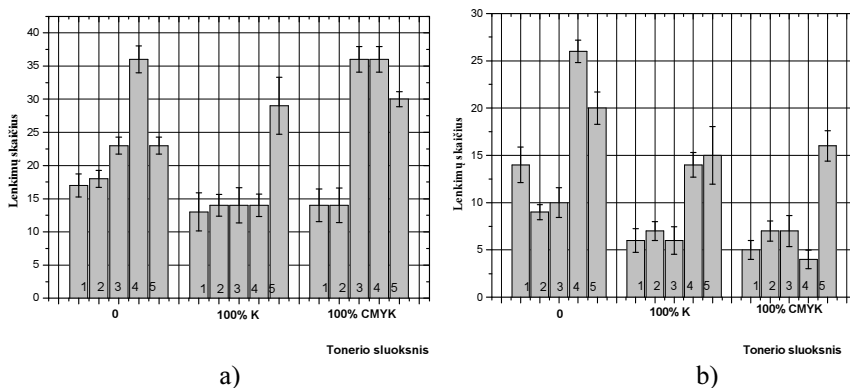
Rašaliniai spaudiniai, kaip ir popierius, daugiau išsitempia prieš nutrūkdamis skersine nei išilgine kryptimi (3.15 pav.). Šią popieriaus savybę lemia tai, kad, tempiant popierių, išsitempia ryšiai tarp plaušelių, kurių skersine kryptimi yra daugiau (Niskannen 2007). Dažų sluoksnis pastebimai nieko nekeičia. Popieriaus su rašaline spauda pailgėjimas yra mažesnis nei popieriaus be spaudos. Pailgėjimo pokytis išilgine kryptimi yra nežymus, o skersine kryptimi – didesnis. Spaudinių ant *Maxi offset* pailgėjimas tempiant skersine kryptimi priklauso nuo to, kiek yra rašalo sluoksnių. Jis pakinta nedaug, kai popierius padengtas vienu rašalo sluoksniu, tačiau padengus keturiais sluoksniais (CMYK) pailgėjimo sumažėjimas yra ryškesnis. Popieriaus *4CC* pailgėjimas tempiant skersine kryptimi sumažėja tiek pat, kiek padengtas vienu, tiek keturiais rašalo sluoksniais (3.15 pav. b). Rašalinių spaudinių ant kreidinių popierių *Art silk* ir *Digigreen* pailgėjimo verčių sklaida manomai yra didelė ir dėsningumą nustatyti nepavyko.

Fleksografinių spaudinių pailgėjimas tempiant priklauso nuo popieriaus rūšies. Jeigu rašalinių spaudinių pailgėjimas išilgine kryptimi visada mažesnis už pailgėjimą skersine kryptimi, tai spaudinių *Digigreen* popieriaus yra atvirkščiai (3.16 pav.). Tačiau fleksografinių spaudinių pailgėjimas priklauso ir nuo popieriaus rūšies. Kai popierius padengiamas fleksografinių dažų sluoksniu, pailgėjimas tempiant išilgine kryptimi sumažėja nedaug ir beveik nepriklauso nuo aniloksinio volelio tūrio. Skersine popieriaus kryptimi popierius pailgėjimas taip pat mažėja nedaug, išskyrus popierių *Digigreen*, kurio pailgėjimas padidėja (iki 35%), dengiant fleksografiniais dažais. Šio reiškinio nepavyko nustatyti – reikalingi detalesni dažų ir popieriaus sąveikos tyrimai.

3.1.3. Spaudinių atsparumas lankstymui

Spaudinių atsparumas daugkartiniam lankstymui (didžiausias dvigubų lenkimų skaičius iki nutrūkstant) kinta padengus popierių dažais. Pokyčiai priklauso nuo spaudos būdo (dažų) ir nuo popieriaus savybių.

Rašalinių spaudinių gauti matavimų rezultatai (3.17 pav.) rodo, kad popieriaus dengimas rašalu mažina spaudinių atsparumą lankstymui abiem popieriaus liejimo kryptimis. Tai ypač gerai stebima spaudiniams ant nekreidinių popierių (3.18 pav.).



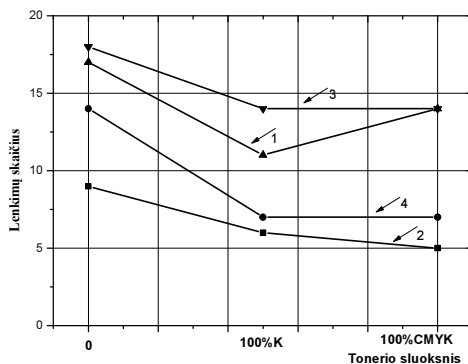
3.17 pav. Popieriaus ir rašalinių spaudinių atsparumas lankstymui:

a) – išilginė kryptis, b) – skersinė kryptis. Popierius:

1 – *Maxi offset* 100 g/m², 2 – *4CC* 100 g/m², 3 – *Galerie art silk* 150 g/m²,
4 – *Digigreen* 150 g/m², 5 – *Lomond* 130 g/m²

Fig. 3.17. Folding resistance of papers and inkjet prints:

a)-machine direction, b)-cross direction). Papers: 1 – *Maxi offset* 100 g/m²,
2 – *4CC* 100 g/m², 3 – *Galerie art silk* 150 g/m², 4 – *Digigreen*, 150 g/m²,
5 – *Lomond* 130 g/m²



3.19 pav. Popieriaus ir rašalinių spaudinių atsparumas lankstymui.

Popierius: 1 – *Maxi offset* 100 g/m² (išilginė kryptis),

2 – *Maxi offset* 100 g/m² (skersinė kryptis),

3 – *4CC* 100 g/m² (išilginė kryptis), 4 – *4CC* 100 g/m² (skersinė kryptis)

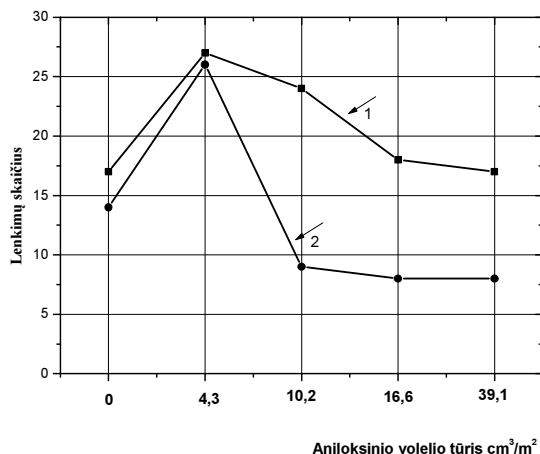
Fig. 3.19. Folding resistance of papers and inkjet prints. Papers:

1 – *Maxi offset* 100 g/m² (machine direction), 2 – *Maxi offset* 100 g/m²
(cross direction), 3 – *4CC* 100 g/m² (machine direction),
4 – *4CC* 100 g/m² (cross direction)

Popieriaus *4CC* atsparumas lankstymui sumažėja tiek išilgine, tiek skersine kryptimis apie 20 %. Tiek pat sumažėja ir popieriaus *Maxi offset* atsparumas lankstymui išilgine kryptimi. Šie rezultatai koreliuoja su atsparumo tempimui rezultatais – rašalinių spaudinių atsparumas tempimui yra mažesnis už atitinkamo popieriaus atsparumą tempimui. Reikia pažymėti, kad spaudinių su vienu ir keturiais rašalo sluoksniais atsparumas lankstymui yra praktiškai tas pat. Tai patvirtina prielaidą, kad rašale esantis vanduo silpnina popierių. Pirmuoju dengimu vanduo kontaktuoja tiesiogiai su popieriaus paviršiumi, o dengiant antru ir kitais sluoksniais, vandens kontaktas su popieriumi yra apsunkintas, ir jis gali net nepasiekti popieriaus.

Spaudinių ant kreidinių popierių atsparumas lankstymui lyginant su popieriumi taip pat mažėja. Tai aiškiai matosi lankstant spaudinius ant *Galerie art silk* 150 g/m² ir *Digigreen* 150 g/m² popierių skersine kryptimi, dengiant vienu ir keturiais sluoksniais. Tačiau rezultatai išilgine kryptimi yra kiek kitokie. Jeigu dengiant vienu sluoksniu atsparumas lankstymui mažėja, tai dengiant keturiais jis didėja. Šį skirtumą su nekreidiniais popieriais galima sieti su skirtinga dažų ir popieriaus sąveika, tačiau tam patvirtinti reikalingi išsamesni tyrimai.

Fleksografinių spaudinių atsparumas lankstymui priklauso nuo dažų kiekio, dengiamo vienu kartu (3.20 pav.).



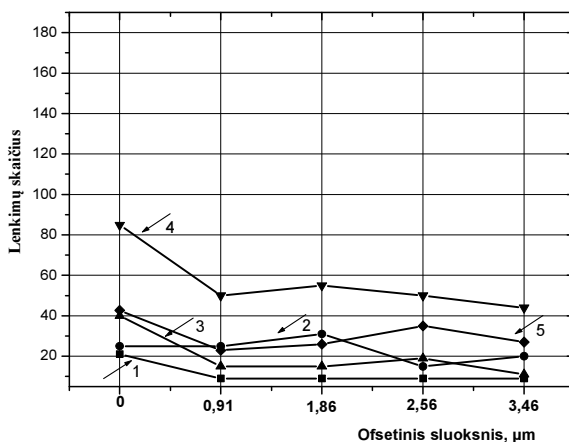
3.20 pav. Popieriaus ir fleksografinių atspaudų atsparumas lankstymui:
1 – išilginė kryptis, 2 – skersinė kryptis. Popierius *Maxi offset* 100 g/m²

Fig. 3.20. Folding resistance of paper and flexographic prints:

1 – machine direction, 2 – cross direction. Paper *Maxi offset* 100 g/m²

Plonas dažų sluoksnis (aniloksinio volelio plotinis tūris $4,3 \text{ cm}^3/\text{m}^2$) padidina atsparumą lankstymui. Tai koreliuoja su spaudinių atsparumo didėjimu, dengiant popierių fleksografiniais dažais. Tačiau didinant dažų sluoksnio storį, atsparumas lankstymui mažėja. Pastarasis rezultatas prieštarauja atsparumo tempimui matavimo rezultatams. Šio reiškinio priežastis neaiški, jį galima sieti su tuo, kad lankstant spaudinį mechaniniai įtempiai yra kitokie, veikia kita kryptimi ir kitokiu greičiu. Tačiau šis reiškinys reikalauja platesnių tyrimų atsižvelgiant į mechaninių deformacijų specifiką ir galimą nuovargį.

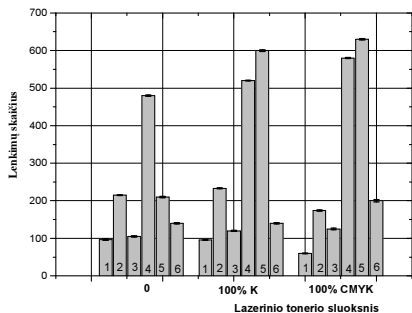
Ofsetinių spaudinių atsparumas lankstymui visiems popieriams ir nepriklausomai nuo dažų yra šiek tiek mažesnis arba paklaidų ribose išlieka tas pats (3.21 pav.). Mažėjimas skersine kryptimi yra žymesnis. Šie rezultatai koreliuoja su atsparumo tempimui rezultatais.



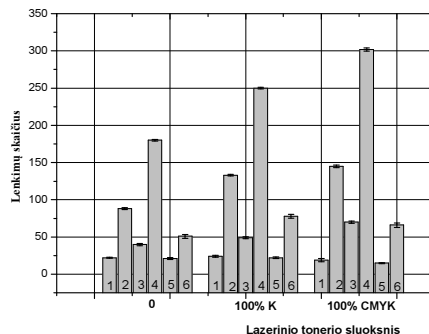
3.21 pav. Popieriaus ir ofsetinių spaudinių atsparumas lankstymui skersine kryptimi. Popierius: 1 – *Maxi offset* 80 g/m², 2 – *Maxi offset* 150 g/m², 3 – *Galerie art silk* 150 g/m², 4 – *Galerie art silk* 300 g/m², 5 – *4CC* 100 g/m²

Fig. 3.21. Folding resistance of papers and offset prints. Papers: 1 – *Maxi offset* 80 g/m², 2 – *Maxi offset* 150 g/m², 3 – *Galerie art silk* 150 g/m², 4 – *Galerie art silk* 300 g/m², 5 – *4CC* 100 g/m²

Lazerinių spaudinių atsparumas lankstymui taip pat skiriasi nuo atitinkamo popieriaus atsparumo lankstymui (3.22 pav.). Nors stebima duomenų sklaida, bet bendra tendencija aiški – spaudinių atsparumas lankstymui yra didesnis. Tai atitinka ir atsparumo tempimui matavimo rezultatus.



a)



b)

3.22 pav. Popieriaus ir lazerinių spaudinių atsparumas lankstymui (a – išilginė kryptis, b – skersinė kryptis): 1 – *Maxi offset* 80 g/m², 2 – *Maxi offset* 150 g/m², 3 – *4CC* 100 g/m², 4 – *4CC* 200 g/m², 5 – *Galerie art silk* 150 g/m², 6 – *Galerie art silk* 300 g/m²

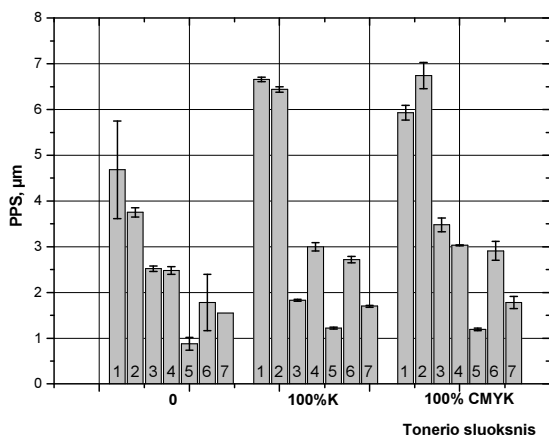
Fig. 3.22. Folding resistance of papers and laser prints (a – machine direction, b – cross direction): 1 – *Maxi offset* 80 g/m², 2 – *Maxi offset* 150 g/m², 3 – *4CC* 100 g/m², 4 – *4CC* 200 g/m², 5 – *Galerie art silk* 150 g/m², 6 – *Galerie art silk* 300 g/m²

3.1.4. Spaudinių paviršiaus šiurkštumas

Spaudinių šiurkštumas yra svarbus, vartojimo prasme, bet taip pat technologiniu požiūriu, jeigu spaudinys yra papildomai apdorojamas, pavyzdžiui, dar spausdinama papildoma informacija, klijuojama ir pan. Be to, spaudinio šiurkštumo pokyčiai dengiant dažais gali suteikti informacijos apie dažų ir popieriaus sąveiką. Šiame skirsnyje pateikiami kai kurie tipiški spaudinių šiurkštumo kaitos pavyzdžiai.

Popieriaus ir rašalinių spaudinių PPS šiurkštumo matavimų rezultatai pateikiami 3.23 ir 3.24 paveiksluose. Iš rezultatų matyti, jog popierių ir spaudinių duomenų sklaida nėra didelė, išskyrus popierių *Maxi offset* ir *Digigreen* 300 g/m². Didelė duomenų sklaida rodo popieriaus paviršiaus makronelygumus. Popierių padengus dažais, duomenų sklaida sumažėja – dažų sluoksnis kompensuoja popieriaus šiurkštumo nevienodumą tame pačiame lape (partijoje). Spaudinių ant kreidinių popierių ir fotografinio popieriaus PPS šiurkštumas yra žymiai mažesnis už spaudinių ant nekreidinio popieriaus. Tai rodo, kad spaudinių šiurkštumą pirmiausiai lemia popierius, bet dažų vaidmuo taip pat pastebimas. Praktiškai visais atvejais spaudinių šiurkštumas yra didesnis už atitinkamo popieriaus šiurkštumą.

Šiurkštumo padidėjimas siekia beveik 2 kartus, nors specialia danga dengto fotografinio popieriaus – tik 1,12 karto (3.6 lentelė).



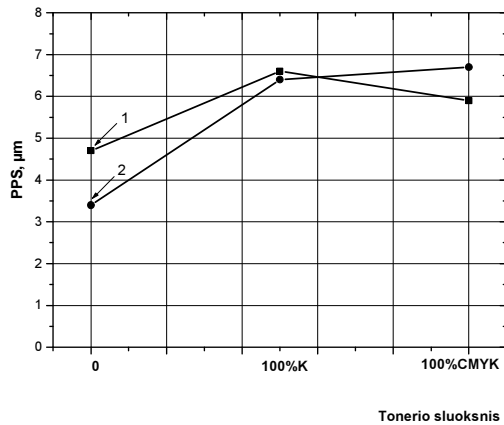
3.23 pav. Rašalinių spaudinių *Parker Print-Surface* šiurkštumas. Popierius: 1 – *Maxi offset* 100 g/m², 2 – *4CC* 100 g/m²; 3 – *Galerie Art Silk* 150 g/m², 4 – *Galerie Art Silk* 300 g/m², 5 – *Digigreen* 150 g/m², 6 – *Digigreen* 300 g/m², 7 – *Lomond* 130 g/m²

Fig. 3.23. *Parker Print-Surface* roughness of inkjet prints. Papers: 1 – *Maxi offset* 100 g/m², 2 – *4CC* 100 g/m², 3 – *Galerie Art Silk* 150 g/m², 4 – *Galerie Art Silk* 300 g/m², 5 – *Digigreen* 150 g/m², 6 – *Digigreen* 300 g/m², 7 – *Lomond* 130 g/m²

3.6 lentelė. Popierių ir rašalinių spaudinių šiurkštumas (*Parker Print-Surface* metodas)

Table 3.6. Roughness of paper and inkjet prints (*Parker Print-Surface* method)

Popierius	Šiurkštumas, μm			Padidėjimas, kar- tais	
	popierius	100% K	100% CMYK	100% K	100% CMYK
<i>Maxi offset</i> 100 g/m ²	4,68	6,66	5,93	1,4	1,3
<i>4CC</i> 100 g/m ²	3,75	6,44	6,74	1,7	1,8
<i>Galerie Art Silk</i> 150 g/m ²	2,52	1,83	3,48	-1,4	1,4
<i>Galerie Art Silk</i> 300 g/m ²	2,48	3,00	3,03	1,2	1,2
<i>Digigreen</i> 150 g/m ²	0,88	1,22	1,19	1,4	1,4
<i>Digigreen</i> 300 g/m ²	1,78	2,72	2,91	1,5	1,6
<i>Lomond</i> 130 g/m ²	1,55	1,70	1,78	1,1	1,1



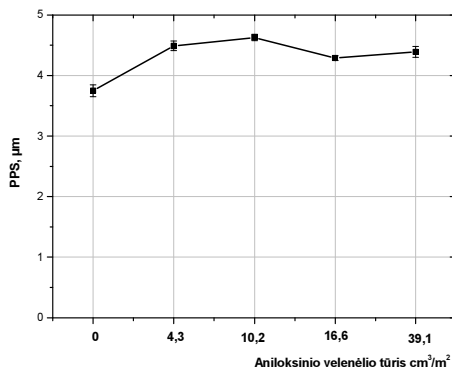
3.24 pav. Rašalinių spaudinių *Parker Print-Surface* šiurkštumas. Popierius:

1 – *Maxi offset* 100 g/m²; 2 – *4CC* 100 g/m²

Fig. 3.24. *Parker Print-Surface* roughness of inkjet prints. Papers:

1 – *Maxi offset* 100 g/m²; 2 – *4CC* 100 g/m²

Didesnis spaudinių šiurkštumas gali būti paaiškintas tuo, kad rašalo vanduo supurena viršutinį sluoksnį. Ženklesnio šiurkštumo didėjimo padengus popieriaus paviršių keturiais (100% CMYK), o ne vienu (100% K) rašalo sluoksniu nepastebėta. Tai reiškia, kad antrojo sluoksnio vaidmuo yra mažesnis, nes pirmasis sluoksnis apsunkina kitų sluoksnių sąveiką su popieriumi. Pateikti rašalinių spaudinių šiurkštumo rezultatai koreliuoja su atsparumo tempiant rezultatais – puresnis sluoksnis yra silpnesnis.



3.25 pav. Fleksografinių spaudinių *Parker Print-Surface* šiurkštumas.

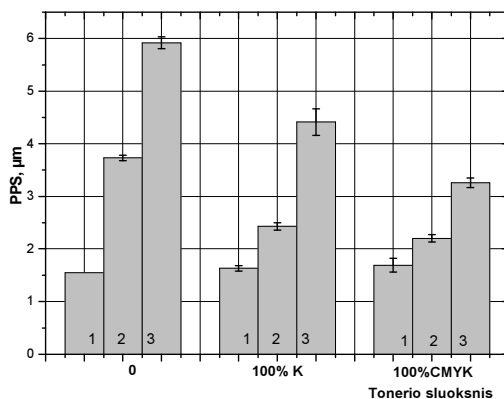
Popierius *4CC* 100 g/m²

Fig. 3.25. *Parker Print-Surface* roughness of flexographic prints.

Paper *4CC* 100 g/m²

Fleksografinių spaudinių šiurkštumas taip pat didesnis už atitinkamo popieriaus šiurkštumą (3.25 pav.). Tačiau šiurkštumo padidėjimas yra mažesnis už rašalinių spaudinių. Šie rezultatai koreliuoja su atsparumo tempimui rezultatais: dažų vandens poveikis fleksografinėje spaudoje yra mažesnis ir jį kompensuoja dažų sluoksnis.

Ofsetinių spaudinių šiurkštumas lyginant su atitinkamu popieriumi išlieka praktiškai nepakitęs. Šis rezultatas koreliuoja su atsparumo tempimui rezultatais – atsparumas tempimui mažėja mažai, kas liudija, kad ir paviršiaus pokyčiai yra nedideli.



3.26 pav. Lazerinių spaudinių *Parker Print-Surface* šiurkštumas.

Popierius: 1 – *Lomond* 130g/m², 2 – *4CC* 100 g/m², 3 – *Maxi offset* 80 g/m²

Fig. 3.26. *Parker Print-Surface* roughness of laser prints.

Papers: 1 – *Lomond* 130g/m², 2 – *4CC* 100 g/m², 3 – *Maxi offset* 80 g/m²

Skirtingai nuo rašalinių ir fleksografinių spaudinių lazerinių spaudinių šiurkštumas yra mažesnis už atitinkamo popieriaus šiurkštumą arba fotografinio popieriaus atveju išlieka toks pat (3.26 pav.). Tai suprantama – palyginus storas išlydyto „tonerio“ sluoksnis yra lygesnis. Tačiau popieriaus šiurkštumo įtaka pastebima – šiurkštesnio popieriaus spaudinys yra taip pat šiurkštesnis.

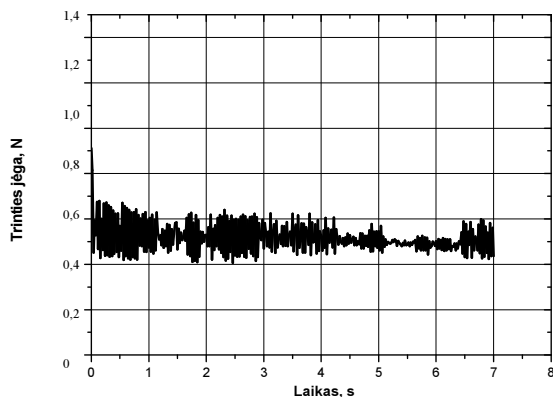
3.1.5. Spaudinių trinties savybės

Spaudinių trinties savybės yra svarbios spausdinant ir kai kuriuose technologiniuose procesuose perdirbant spaudinius. Kartu trinties savybės lyginant su popieriaus trinties savybėmis suteikia informacijos apie spaudinio kaip kompozitinės medžiagos ypatybes ir jos formavimąsi spausdinant.

Trinties savybes charakterizuoja kompleksas parametrų – statinis ir kinetinis trinties koeficientai, jų priklausomybė nuo slėgio (apkrovos), slydimo greičio, kontaktuojančių paviršių ir kiti. Šiame skirsnyje pateikiami trinties koeficientų tarp spaudinių, spaudinių ir popieriaus, bei popierių priklausomybės nuo apkrovos, trinties jėgos kaitos.

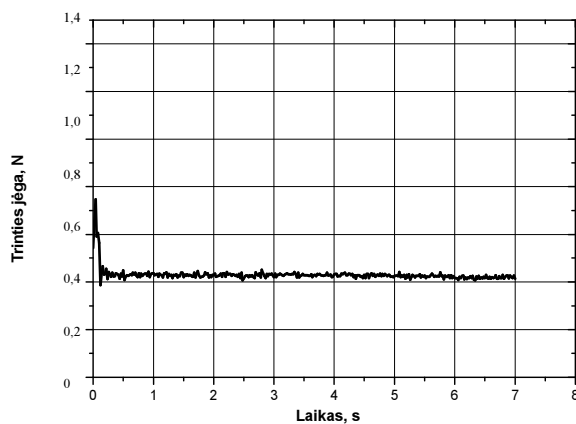
Trinties jėgos kaita. Trinties jėgos, t. y. jėgos, kurios reikia tempti „rogutes“ įveikiant trintį, kaita joms slystant suteikia informaciją ne tik apie statinės ir kinetinės trinties dydį, bet ir apie slydimo pobūdį. Jis gali būti: reguliarusis „prilipimas – slydimas“, nereguliarusis „prilipimas – slydimas“ ir tolygus slydimas be prilipimo (Berman *et al.* 1996, Maeda *et al.* 2002, Lee *et al.* 2013). Trinties jėgos kaita priklauso nuo popieriaus ir dažų. Rašalinių, fleksografinių ir ofsetinių spaudinių ant nekreidinio popieriaus (3.27, 3.28 ir 3.30 pav.) ir kreidinių popierių (3.29 pav.) trinties jėgos kaita atitinka tipiską nereguliarųjį „prikibimas – slydimas“ judesį. Trinties profilyje daugiau ar mažiau išreikštas trinties jėgos maksimumas. Ši maksimali jėga atitinka statinės trinties jėgą. Toliau trinties jėga mažėja ir jėgos kaitą lemia kinetinė trintis. „Prikibimo – slydimo“ amplitudė ir jos kaitos dažnis priklauso nuo paviršiaus topografijos (visų pirma, paviršiaus šiurkštumo) ir slydimo greičio. Kreidiniai popieriai yra glotnesni (3.1.4 skirsnis) ir jų kinetinės trinties kaitos amplitudė yra pastebimai mažesnė (3.28 ir 3.29 pav.), tačiau trinties jėga yra didesnė. Tai rodo, kad trinties savybes lemia ne vien paviršiaus šiurkštumas. Esant reguliariajam „prilipimas – slydimas“ slydimui, trinties jėgos kaitos amplitudė turi būti pastovi. Stebėtais atvejais kaitos amplitudė nepastovi ir kinta plačiame diapazone. Tai liudija, kad paviršiaus pasipriešinimas yra nereguliarus dėl netvarkingai išsidėsčiusių nelygumų ir nevienodo jų pasipriešinimo deformacijai. Be to, gali turėti įtakos ir paviršių sukibimo jėgų kaita, slystant paviršiams vienas kitu. Esant „prilipimas – slydimas“ tipo slydimui trinties jėgos fluktuacijos dažnis turi didėti didėjant slydimo greičiui. Visais tirtais atvejais tas ir buvo stebėta. Jėgos svyravimų dažnio didėjimo charakteringas pavyzdys pateiktas 3.31 paveiksle, kurio b dalyje parodytas jėgos svyravimas antroje slydimo sekundėje didesniu laiko masteliu.

Trinties jėgos kaita slydimo metu tarp rašalinių spaudinių ant foto popieriaus (3.31 pav.) yra kitokio pobūdžio. Matomas tik mažas maksimumas (prikibimas), kurį keičia beveik tolygus slydimas. Maža trinties jėgos kaita rodo, kad pagrindinai vyksta tolygus slydimas, bet kintanti amplitudė rodo, kad yra nedidelis „prilipimas – slydimas“ indėlis.



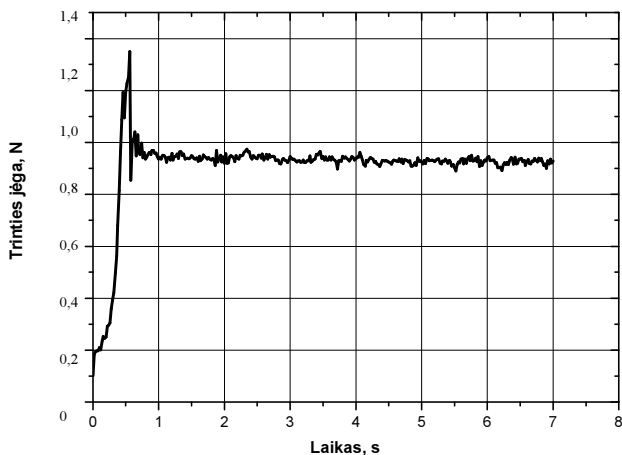
3.27 pav. Trinties jėgos kaita slydimo metu, 4CC popierius, rašalinė spauda, 100% CMYK

Fig. 3.27. Friction force variation during sled sliding. 4CC paper, ink-jet, 100% CMYK



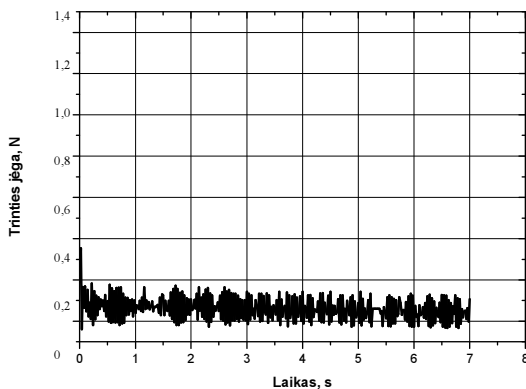
3.28 pav. Trinties jėgos kaita slydimo metu, 4CC popierius, fleksografinė spauda, 100%

Fig. 3.28. Friction force variation during sled sliding. 4CC paper, flexographic ink, 100%



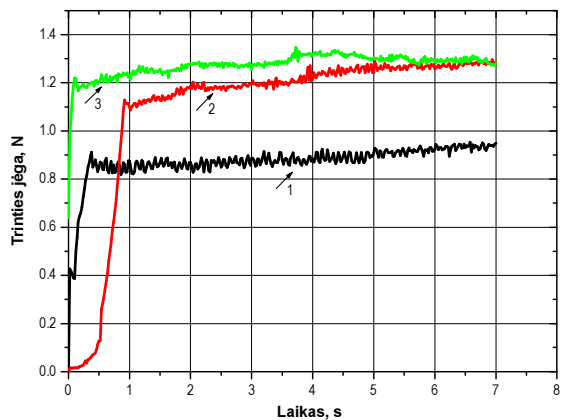
3.29 pav. Trinties jėgos kaita slydimo metu, Digigreen popierius, flexografinė spauda, 100%

Fig. 3.29. Friction force variation during sled sliding. Digigreen paper, flexographic ink, 100%

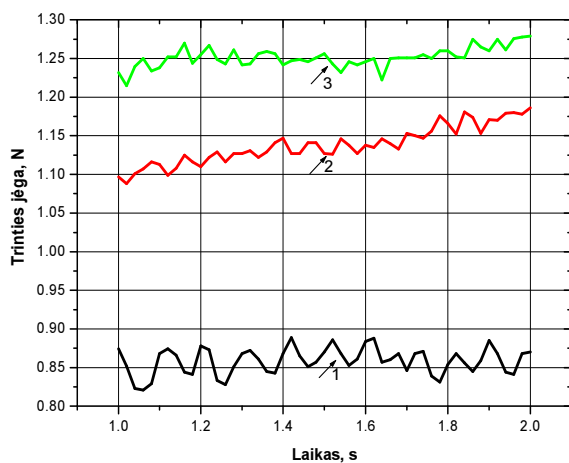


3.30 pav. Trinties jėgos kaita slydimo metu, 4CC popierius, ofsetinė spauda, 100% CYAN

Fig. 3.30. Friction force variation during sled sliding. 4CC popierius, offset ink, 100% CYAN



a)



b)

3.31 pav. Trinties jėgos kaita slydimo metu: a) 0–7 s, (b) 1–2s.

Greitis: 1 – 50 mm/min, 2 – 100 mm/min, 3 – 300 mm/min.

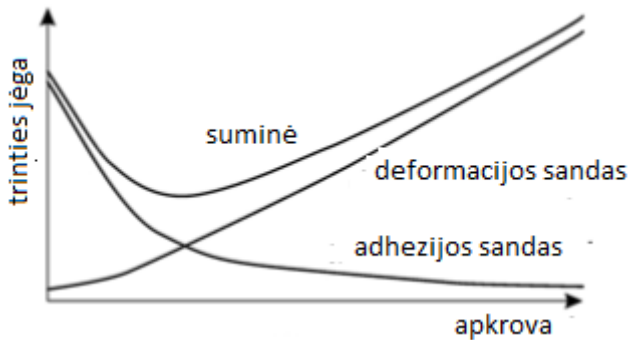
Foto popierius, rašalinė spauda, 100% CMYK

Fig. 3.31. Friction force variation during sled sliding: (a) 0–7 s, (b) 1–2s.

Sliding speed: 1 – 50 mm/min, 2 – 100 mm/min, 3 – 300 mm/min.

Photopaper, ink-jet, 100% CMYK

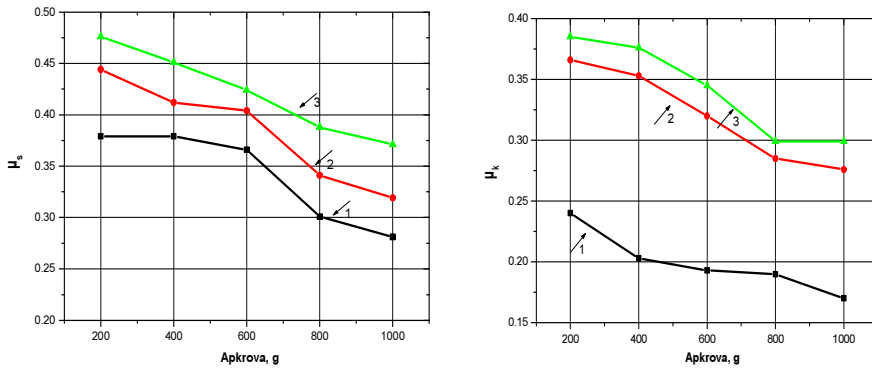
Trinties koeficientų priklausomybė nuo apkrovos (slėgio). Įprastai teigiama, kad trinties jėga yra proporcinga normaliai apkrovai (Amontono dėsnis, Jianping *et al.* 2004). Eksperimentai parodė, kad šis dėsnis galioja kai kuriems polimerams, bet ir tai ne prie visų apkrovų. Yra žinoma, kad polimerų trintis dažniausiai priklauso nuo apkrovos (3.32 pav.), ir didėjant apkrovai gali mažėti arba didėti (Myshkin 2009, Kalácska 2013). Tai priklauso nuo paviršiaus nelygumų deformacijos metu. Buvo atlikta serija trinties tyrimų su rašaliniais, fleksografišiais, lazeriniais, ofsetiniais spaudiniais, keičiant apkrovą. Kai kurie tipiški rezultatai, iliustruojantys trinties koeficientų priklausomybę nuo apkrovos, pateikiami (3.33–3.39 pav.). Visais atvejais abu, statinis μ_s ir kinetinis μ_k trinties koeficientai tarp popierių ir spaudinių (popierių į popierių, spaudinys į spaudinį, spaudinys į popierių) mažėjo didėjant apkrovai.



3.32 pav. Trinties koeficientų priklausomybė nuo apkrovos
(schema, Kalácska 2013)

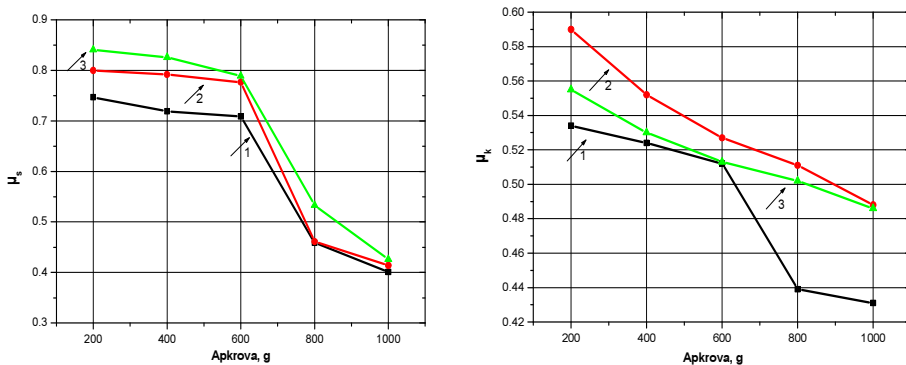
Fig. 3.32. Dependence of the friction coefficients on the load
(scheme, Kalácska 2013)

Polimeruose trintis priklauso nuo nelygumų deformacijos ir sankybos (adhezijos) jėgų nelygumų kontakte, ir trinties koeficientų mažėjimas gali būti aiškinamas atsižvelgiant į adhezijos vaidmenį ir deformacijos faktorių. Didėjant apkrovai (slėgiui), paviršiaus nelygumai suspaudžiami, jie išsiplečia ir juos deformuoti reikia didesnės jėgos. Šiuo atveju trinties koeficientai turėtų arba nepriklausyti nuo apkrovos, arba net didėti. Iš kitos pusės, didėjant apkrovai, didėja realaus kontakto plotas ir didėja adhezijos indėlis, t. y. galima laukti trinties koeficientų didėjimo. Tačiau kontakto plotas ir adhezijos indėlis didėja lėčiau nei apkrova. Tada, nors trinties jėga didėjant slėgiui didėja, tačiau trinties koeficientai mažėja. Kadangi spaudinių ir popieriaus trinties koeficientai mažėja didėjant apkrovai, galima tvirtinti, kad spaudinių trinties savybes pagrindinai lemia adhezinės jėgos.



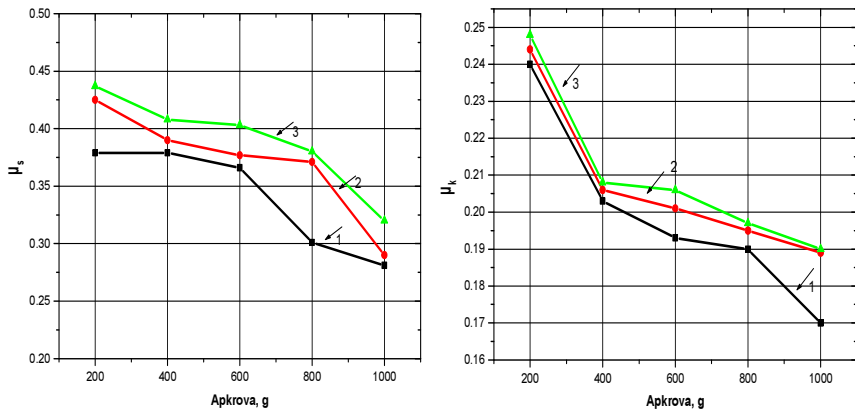
3.33 pav. Statinio μ_s ir kinetinio μ_k trinties koeficientų priklausomybė nuo apkrovos: 1 – popierius į popierių, 2 – popierius į atspaudą, 3 – atspaudas į atspaudą. Popierius 4CC, rašalinė spauda, 100% CMYK

Fig. 3.33. Dependence of static μ_s and kinetic μ_k friction coefficients on load: 1 – paper-to-paper, 2 – paper-to-print, 3 – print-to-print. Paper 4CC, ink-jet, 100% CMYK

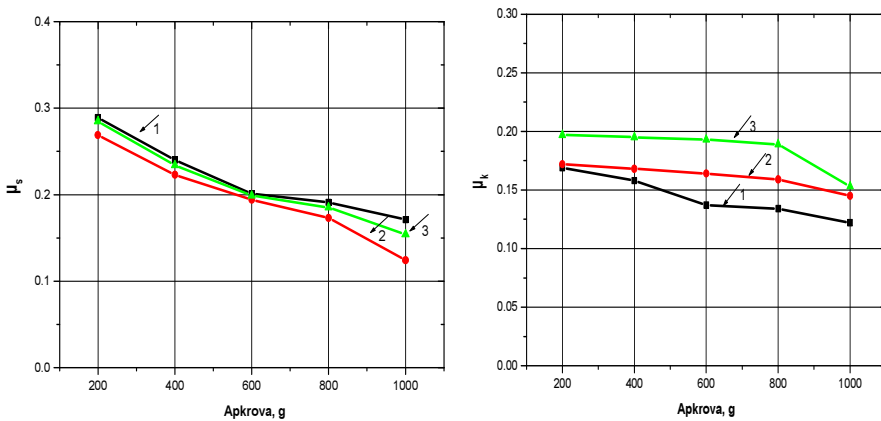


3.34 pav. Statinio (μ_s) ir kinetinio (μ_k) trinties koeficientų priklausomybė nuo apkrovos: 1 – popierius į popierių, 2 – popierius į atspaudą, 3 – atspaudas į atspaudą. Foto popierius, rašalinė spauda, 100% CMYK

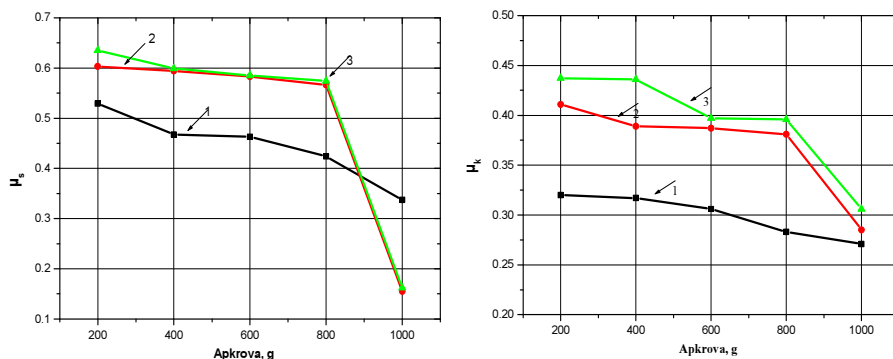
Fig. 3.34. Dependence of static (μ_s) and kinetic (μ_k) friction coefficients on load: 1 – paper-to-paper, 2 – paper-to-print, 3 – print-to-print. Photo paper, ink-jet, 100% CMYK



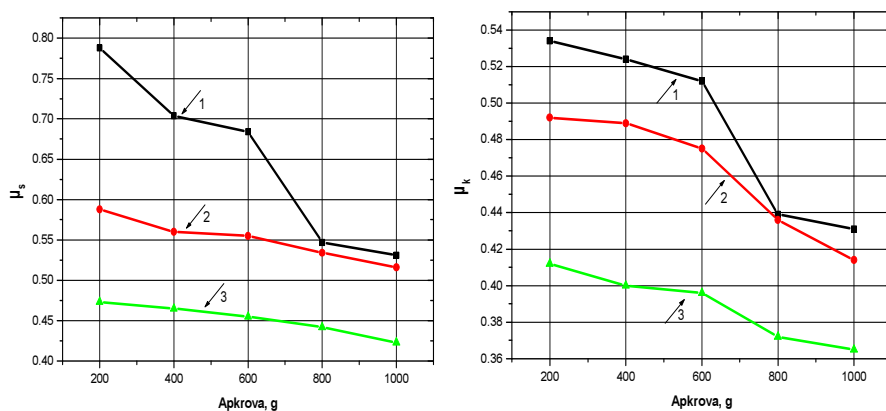
3.35 pav. Statinio μ_s ir kinetinio μ_k trinties koeficientų priklausomybė nuo apkrovos: 1 – popierius į popierių, 2 – popierius į atspaudą, 3 – atspaudas į atspaudą. Popierius 4CC, lazerinė spauda, 100% CMYK
Fig. 3.35. Dependence of static μ_s and kinetic μ_k friction coefficients on load: 1 – paper-to-paper, 2 – paper-to-print, 3 – print-to-print.
 Paper 4CC, laser, 100% CMYK



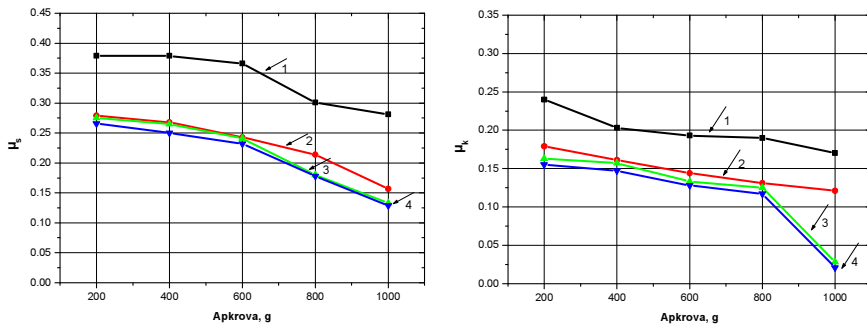
3.36 pav. Statinio μ_s ir kinetinio μ_k trinties koeficientų priklausomybė nuo apkrovos: 1 – popierius į popierių, 2 – popierius į atspaudą, 3 – atspaudas į atspaudą. Popierius Maxi offset, fleksografinė spauda, 100%
Fig. 3.36. Dependence of static μ_s and kinetic μ_k friction coefficients on load: 1 – paper-to-paper, 2 – paper-to-print, 3 – print-to-print.
 Paper Maxi offset, flexographic ink, 100%



3.37 pav. Statinio μ_s ir kinetinio μ_k trinties koeficientų priklausomybė nuo apkrovos: 1 – popierius į popierių, 2 – popierius į atspaudą, 3 – atspaudas į atspaudą. Popierius *Digigreen*, fleksografinė spauda, 100%
Fig. 3.37. Dependence of static μ_s and kinetic μ_k friction coefficients on load: 1 – paper-to-paper, 2 – paper-to-print, 3 – print-to-print.
 Paper *Digigreen*, flexographic ink, 100%



3.38 pav. Statinio μ_s ir kinetinio μ_k trinties koeficientų priklausomybė nuo apkrovos: 1 – popierius į popierių, 2 – popierius į atspaudą, 3 – atspaudas į atspaudą. Foto popierius, fleksografinė spauda, 100%
Fig 3.38. Dependence of static μ_s and kinetic μ_k friction coefficients on load: 1 – paper-to-paper, 2 – paper-to-print, 3 – print-to-print.
 Photo paper, flexographic ink, 100%



3.39 pav. Statinio μ_s ir kinetinio μ_k trinties koeficientų priklausomybė nuo apkrovos: 1 – popierius, 2 – Cyan, 3 – Magenda, 4 – Yellow.

Popierius 4CC, trintis tarp ofsetinių atspaudų.

Fig. 3.39. Dependence of static μ_s and kinetic μ_k friction coefficients on load: 1 – paper, 2 – Cyan, 3 – Magenda, 4 – Yellow.

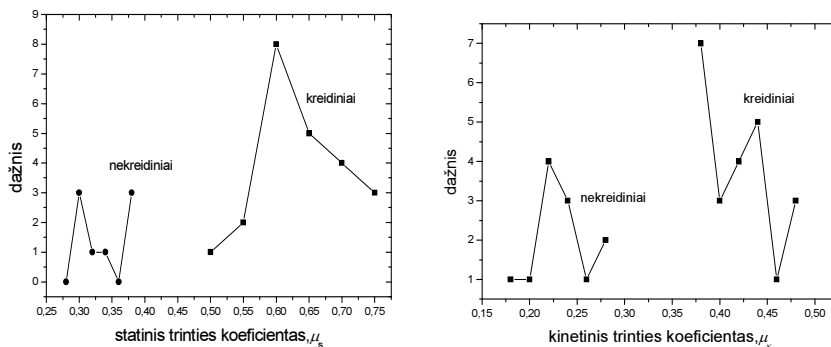
Paper 4CC, friction between offset prints

Spaudinių trinties savybes lemia adhezinės jėgos, tai galima laukti, kad jos bus skirtingos skirtingiems spaudiniams, gautiems su skirtingais dažais. Skirtumas išryškėja lyginant rašalinius, fleksografinius, lazerinius ir ofsetinius spaudinius (3.33–3.39 pav.). Rašalinių, fleksografinių (išskyrus fleksografinius spaudinius ant foto popieriaus) ir lazerinių spaudinių abu trinties koeficientai „spaudinys – spaudinys“ ir „spaudinys – popierius“ yra didesni už „popierius – popierius“ (nuo 10 iki 35%). Trintis „spaudinys – spaudinys“ yra didesnė už „spaudinys-popierius“ trintį. Ofsetinių spaudinių statinis ir kinetinis trinties koeficientai, priešingai, yra pastebimai mažesni (iki 30%) už popieriaus į popierių trinties koeficientus. Tai reiškia, kad ofsetinių dažų adhezija yra pastebimai mažesnė už fleksografinių ir rašalinių dažų adheziją. Rašalinių spaudinių ant foto popieriaus trintis yra mažesnė (iki 10%) už foto popieriaus (šio popieriaus paskirtis yra rašalinis spausdinimas) trintį. Tuo tarpu fleksografinių spaudinių ant šio popieriaus trintis yra mažesnė už foto popieriaus trintį (apie 35%). Tai gali būti sietina su skirtinga rašalo ir fleksografinių dažų sąveika su foto popieriaus specialia danga, bet tai reikalauja atskiro tyrimo.

Trintis gali priklausyti ir nuo paviršiaus šiurkštumo. Be abejo, visiškai atmesti spaudinių ir popieriaus topografijos (šiurkštumo) įtakos į trinčiai negalima, tačiau tiesioginio ryšio nustatyti nepavyko. Fleksografinių ir rašalinių spaudinių šiurkštumas yra didesnis už atitinkamo popieriaus šiurkštumą (3.1.4 skyrelyje), ir tai turėtų didinti trinties koeficientus. Tačiau ofsetinių spaudinių šiurkštumas yra praktiškai toks pat, kaip ir popieriaus, o trinties koeficientai yra mažesni.

Visų tirtų spaudinių statinės ir kinetinės trinties koeficientai mažėja didėjant apkrovai, apibendrinant galima teigti, kad spaudinių trinties savybes lemia adhezinės jėgos, o nelygumų deformacija vaidina antraeilį vaidmenį.

Absoliučios trinties koeficientų vertės. Praktiniu požiūriu yra svarbios absoliučios trinties koeficientų vertės, kurios priklauso nuo popieriaus topografijos ir paviršiaus sudėties. Buvo palygintos fleksografinių ir rašalinių spaudinių ant nekreidinių ir kreidinių popierių ir, esant skirtingiems dažų sluoksnio storiams, trinties koeficientų vertės. Trinties koeficientų vertės, išmatuotos esant tai pačiai apkrovai, pateiktos 3.8 lentelėje. Buvo atskirai analizuojamos trinties koeficientų vertės nekreidiniams ir kreidiniams popieriams bei rašaliniams ir fleksografiniams spaudiniams. Atskirose grupėse verčių sklaida yra nedidelė ($\pm 5\%$), ir aiškiai matomas skirtumas tarp kreidinių ir nekreidinių (3.40 pav., 3.7 lentelė).



3.40 pav. Spaudinių ant kreidinio ir nedengto popierių statinio μ_s ir kinetinio μ_k trinties koeficientų histogramos

Fig. 3.40. The histograms of static μ_s and kinetic μ_k coefficients of friction of prints on coated and uncoated papers

3.7 lentelė. Trinties koeficientų vidurkiai, apkrova 200 g

Table 3.7. Mean values of the friction coefficients at 200 g load

Popieriaus tipas	Fleksografiniai spaudiniai		Rašaliniai spaudiniai	
	Statinis trinties koeficientas, μ_s	Kinetinis trinties koeficientas, μ_k	Statinis trinties koeficientas, μ_s	Kinetinis trinties koeficientas, μ_k
Nekreidinis	0,34 \pm 0,03	0,22 \pm 0,02	0,45 \pm 0,01	0,22 \pm 0,01
Kreidinis	0,63 \pm 0,02	0,42 \pm 0,02	0,60 \pm 0,03	0,40 \pm 0,02
Foto popierius	—	—	0,85 \pm 0,03	0,70 \pm 0,03

3.8 lentelė. Fleksografinių ir rašalinių spaudinių statinių ir kinetinių trinties koeficientų vertės

Table 3.8. Values of flexographic and ink-jet prints static and kinetic coefficients of friction

Spaudos tipas	Popierius	Dažų kiekis	Statinis trinties koeficientas, μ_s	Kinetinis trinties koeficientas, μ_k
Flekso-grafinė	<i>Galerie art silk</i> 150 g/m ² (kreidinis)	4,3 cm ³ /cm ²	0,66	0,44
	<i>Galerie art silk</i> 150 g/m ² (kreidinis)	10,2 cm ³ /cm ²	0,56	0,42
	<i>Galerie art silk</i> 150 g/m ² (kreidinis)	16,6 cm ³ /cm ²	0,74	0,45
	<i>Galerie art silk</i> 150 g/m ² (kreidinis)	39,1 cm ³ /cm ²	0,68	0,43
	<i>Digigreen</i> 150 g/m ² (kreidinis)	4,3 cm ³ /cm ²	0,69	0,48
	<i>Digigreen</i> 150 g/m ² (kreidinis)	10,2 cm ³ /cm ²	0,64	0,44
	<i>Digigreen</i> 150 g/m ² (kreidinis)	16,6 cm ³ /cm ²	0,73	0,48
	<i>Digigreen</i> 150 g/m ² (kreidinis)	39,1 cm ³ /cm ²	0,67	0,43
	<i>Maxi offset</i> (nekreidinis)	4,3 cm ³ /cm ²	0,32	0,21
	<i>Maxi offset</i> (uncoated)	10,2 cm ³ /cm ²	0,30	0,18
	<i>Maxi offset</i> (nekreidinis)	16,6 cm ³ /cm ²	0,29	0,20
	<i>Maxi offset</i> (nekreidinis)	39,1 cm ³ /cm ²	0,29	0,23
	<i>4CC</i> (nekreidinis)	4,3 cm ³ /cm ²	0,38	0,21
	<i>4CC</i> (nekreidinis)	10,2 cm ³ /cm ²	0,38	0,25
	<i>4CC</i> (nekreidinis)	16,6 cm ³ /cm ²	0,34	0,24
	<i>4CC</i> (nekreidinis)	39,1 cm ³ /cm ²	0,38	0,27
Rašalinė	<i>Galerie art silk</i> 150 g/m ² (kreidinis)	100% K	0,60	0,42
	<i>Galerie art silk</i> 150 g/m ² (kreidinis)	100% CMYK	0,61	0,44
	<i>Galerie art silk</i> 150 g/m ² (kreidinis)	100% K	0,68	0,35
	<i>Digigreen</i> 300 g/m ² (kreidinis)	100% K	0,56	0,38
	<i>Digigreen</i> 300 g/m ² (kreidinis)	100% CMYK	0,56	0,35
	<i>Maxi offset</i> (nekreidinis)	100% K	0,43	0,21
	<i>Maxi offset</i> (nekreidinis)	100% CMYK	0,46	0,22
	<i>4CC</i> (nekreidinis)	100% K	0,43	0,24
	<i>4CC</i> (nekreidinis)	100% CMYK	0,56	0,39
	Fotopopierius <i>Lomond</i>	100% K	0,86	0,60
	Fotopopierius <i>Lomond</i>	100% CMYK	0,84	0,60

Pastaba: trinties koeficientų matavimo paklaida $\pm 5\%$

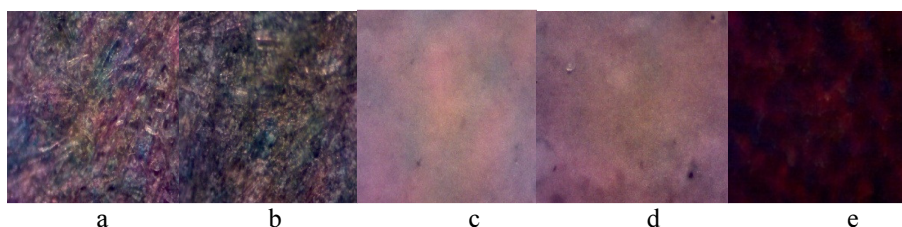
Spaudinių ant kreidinių popierių trinties koeficientai yra ženkliai didesni už spaudinių ant nekreidinių popierių trinties koeficientus, nors spaudinių ant kreidinių popierių šiurkštumas yra mažesnis (3.1.4 skyrelyje). Tai rodo, kad trinties dydį pirmiausiai lemia adhezijos jėgos. Yra nedidelis skirtumas tarp

fleksografinių ir rašalinių spaudinių (apie 5%), kuris sietinas su paviršiaus pokyčiais, kurie stebėti tiriant mechanines spaudinių savybes.

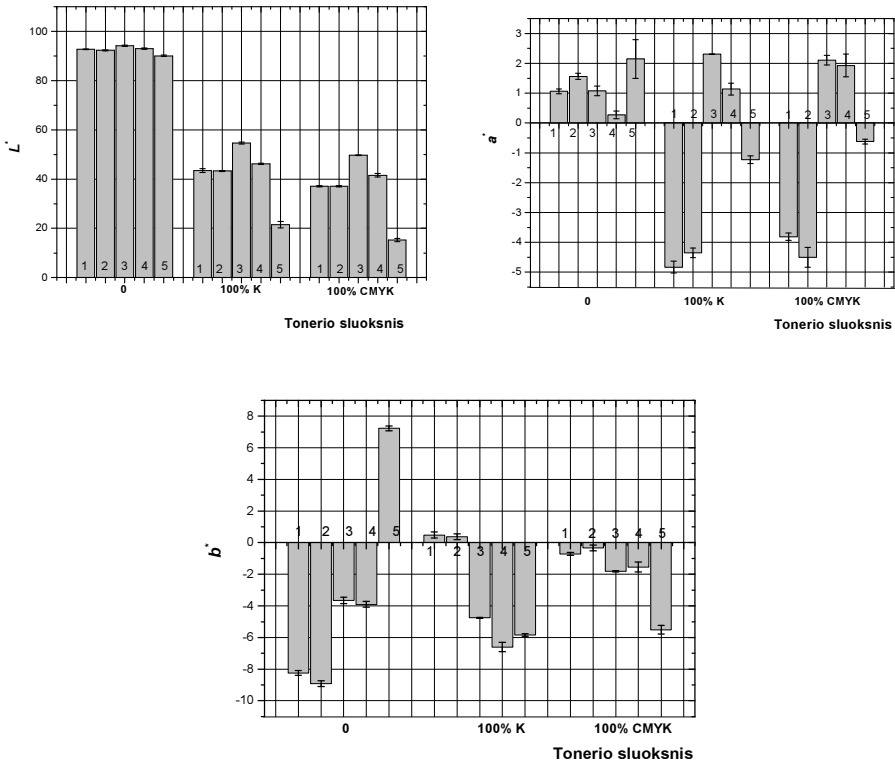
3.1.6. Spaudinių spalvinės charakteristikos

Spaudinių pateiktos informacijos (fotografijos, piešiniai ir pan.) spalvinės charakteristikos kartu su mechaninėmis lemia spaudinių vartotojiškas ir prekinės savybes (Johansson *et al.* 2007, Kipphan 2001). Įprastai yra laikoma, kad spaudinių spalvinės charakteristikos iš esmės lemia popieriaus baltumas ir nedaug krepiama dėmesio į tai, kaip pasikeičia skirtingų dažų sluoksnis ant skirtingų popierių (Pauler 2012). Ši kaita yra pakankamai ženkli ir turi įtakos spaudinių spalvinėms charakteristikoms. Buvo tirtos spaudinių CIE spalvinės charakteristikos.

Popieriaus ir rašalinių juodų (100%K ir CMYK100%) spaudinių spalvinės koordinatės $L^*a^*b^*$ pateikiamos 3.42 paveiksle. Nors popierių šviesis L^* skiriasi nedaug (nuo 0,2 iki 3%), spaudinių L^* koordinatė skiriasi ženkliai. Spaudiniai ant nekreidinių popierių yra tamsesni už spaudinius ant kreidinių popierių. Spaudinių ant foto popieriaus šviesis yra mažiausias, t. y. juodos spalvos optinis tankis yra didesnis. Dar didesnis koordinačių a^*b^* skirtumas. Spaudinių ant nekreidinių popierių ir fotopopieriaus net keičiasi atspalvis – didėja žalios spalvos indėlis (a^* koordinatė iš teigiamo tampa neigiama). b^* koordinatės pokyčiai yra nežymūs. Tačiau visais atvejais tiesioginio ryšio tarp popieriaus ir spaudinių charakteristikų nebuvo nustatyta. Tai yra, todėl, kad dažų sąveika su skirtingais popieriais skiriasi, ir susidaro skirtinga dažų sluoksnio paviršiaus struktūra (3.41 pav.).



3.41 pav. 100 % K ir 100 % CMYK rašalinių spaudinių paviršius:
a) 4CC, 100 % K; b) 4CC, 100 % CMYK; c) *Galerie Art Silk*, 100 % K;
d) *Galerie Art Silk*, 100 % CMYK; e) foto popierius *Lomond*, didinimas 40^x
Fig. 3.41. Surface of inkjet prints 100 % K and 100 % CMYK:
a) 4CC, 100 % K; b) 4CC, 100 % CMYK; c) *Galerie Art Silk*, 100 % K,
d) *Galerie Art Silk*, 100 % CMYK, e) photo paper *Lomond*,
magnification 40^x



3.42 pav. Popieriaus ir rašalinių spaudinių CIE $L^*a^*b^*$ koordinatės

Popierius: 1 – Maxi offset 100 g/m², 2 – 4CC 100 g/m²,

3 – Galerie Art Silk 150 g/m², 4 – Digigreen 150 g/m²,

5 – Lomond 130 g/m²

Fig. 3.42. CIE $L^*a^*b^*$ coordinates of papers and inkjet prints. Papers:

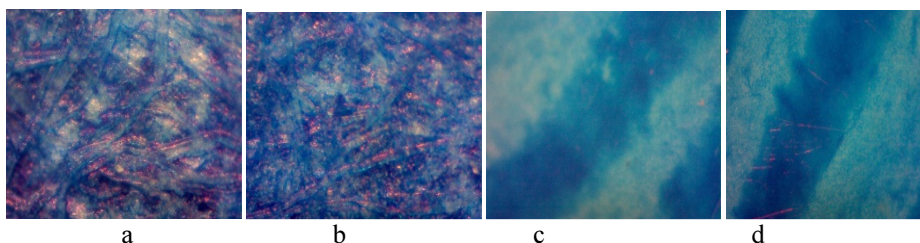
1 – Maxi offset 100 g/m², 2 – 4CC 100 g/m², 3 – Galerie Art Silk 150 g/m²,

4 – Digigreen 150 g/m², 5 – Lomond 130 g/m²

Atskirai reikia pažymėti, kad spaudinių 100% K ir CMYK100% spalvinės charakteristikos beveik nesiskiria, t. y. užtenka vieno sluoksnio. Šis rezultatas sutampa su mechaninių savybių tyrimo rezultatais, kurie rodo, kad 100%K spaudinių savybės nežymiai skiriasi nuo CMYK100% spaudinių.

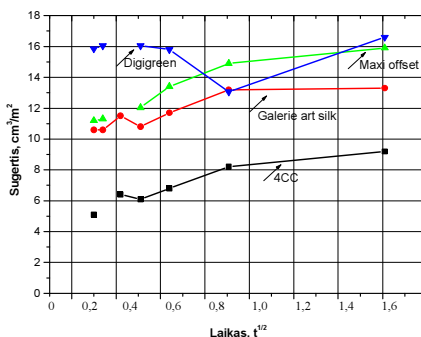
Panašūs rezultatai gauti tiriant fleksografinius spaudinius, atspaudintus žydros spalvos dažais (3.43 pav.). Visais atvejais tiesioginio ryšio tarp popieriaus ir spaudinių charakteristikų atsekti taip pat nepavyksta. Spaudinio ant nekreidinio popieriaus *Maxi offset* žydra spalva yra mažesnio sodrio lyginant su kreidiniais popieriais – koordinatės $-b^*$ vertė yra mažesnė. Tačiau išsiskiria nekreidinis

popierius 4CC: toks pat dažų sluoksnis yra beveik juodas. Šis netikėtas rezultatas gali būti paašškintas skirtingu dažų įsigėrimu: dažai į kitus popierius įsigeria daugiau, o ant popieriaus 4CC lieka paviršiuje ir efektyviau sugeria krentančią spinduliuotę (įsigėrusių į popierių dažų sąveiką su spinduliuote kliudo celiuliozės plaušeliai). Šią prielaidą patvirtina dažų įsigėrimo matavimai *Bristovo* metodu (3.44 pav.): esant trumpiems laikams (laikas, artimas spausdinimo kontaktui) popieriaus 4CC dažų sugertis yra apie duotris kartus mažesnė už kitų popierių sugertį. Spaudinių dažų sluoksnio paviršiaus mikrofotografijos (3.43 pav.) patvirtina teiginį, kad spalvų charakteristikų skirtumus lemia dažų ir popieriaus paviršiaus sąveika.



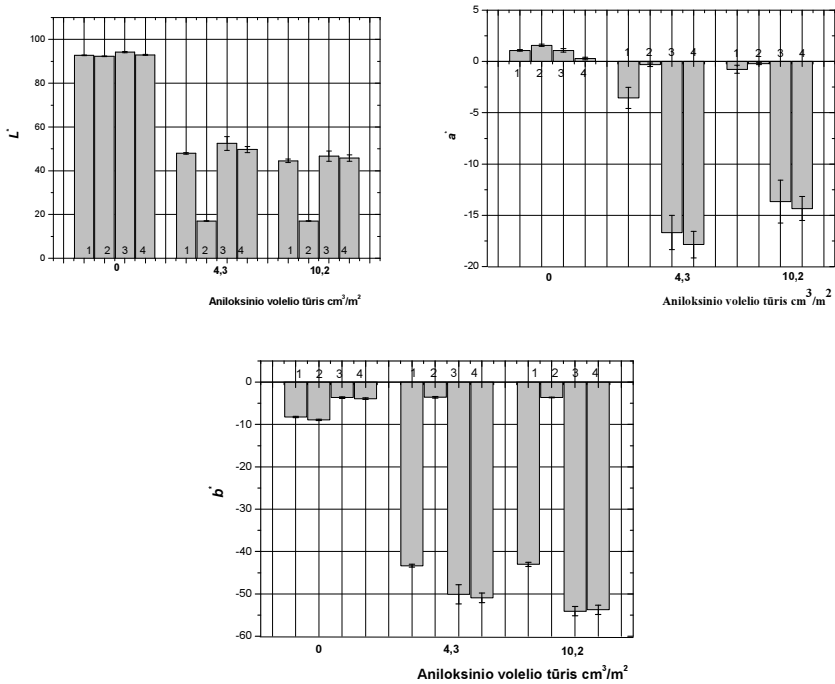
3.43 pav. Fleksografinių atspaudų, kai aniloksinio volelio tūris $4,3 \text{ cm}^3/\text{m}^2$ paviršiaus nuotraukos. Popierius: a – *Maxi offset* 100 g/m², c – 4CC 100 g/m², c – *Galerie art silk* 150 g/m², d – *Digigreen* 150 g/m², didinimas 40^x

Fig. 3.43. Surface photos of flexographic prints, anilox roller volume $4,3 \text{ cm}^3/\text{m}^2$. Papers: a – *Maxi offset* 100 g/m², b – 4CC 100 g/m², c – *Galerie art silk* 150 g/m², d – *Digigreen* 150 g/m², magnification 40^x



3.44 pav. Fleksografinių dažų įsigėrimo priklausomybė nuo kontakto laiko

Fig. 3.44. Flexographic ink absorption dependence on the contact time



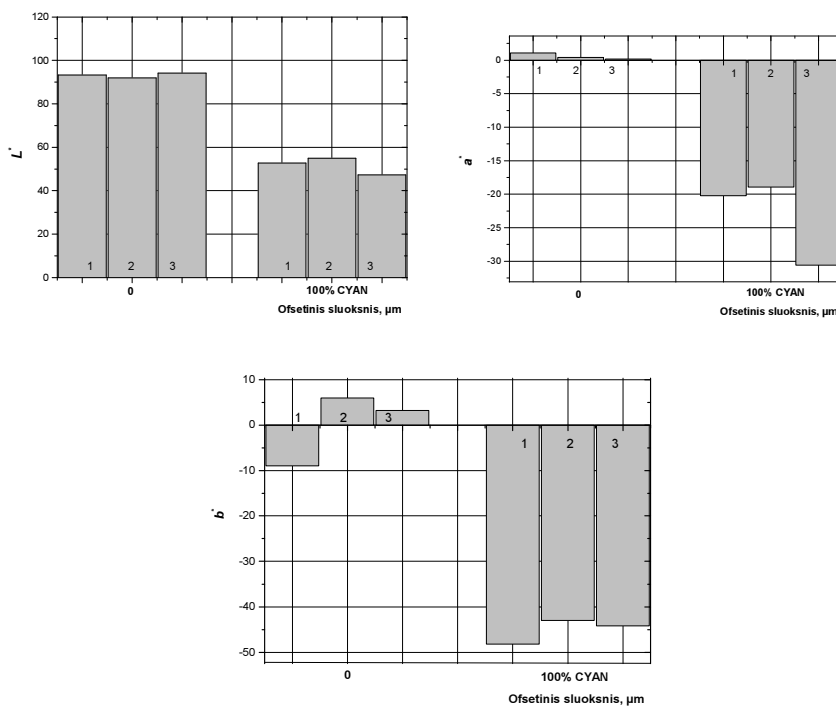
3.45 pav. Fleksografinių atspaudų CIE $L^*a^*b^*$ spalvų koordinatės.

Popierius: 1 – *Maxi offset* 100 g/m², 2 – *4CC* 100 g/m²,
3 – *Galerie art silk* 150 g/m², 4 – *Digigreen* 150 g/m²

Fig. 3.45. CIE $L^*a^*b^*$ coordinates of flexographic prints. Papers:

1 – *Maxi offset* 100 g/m², 2 – *4CC* 100 g/m², 3 – *Galerie art silk* 150 g/m²,
4 – *Digigreen* 150 g/m²

Ofsetinių spaudinių spalvinės koordinatės CIE $L^*a^*b^*$ pateikiamos 3.46 paveiksluose. Šiuo atveju, skirtingai nei rašalinių ir fleksografinių atspaudų, spalvinės charakteristikos nedaug priklauso nuo popieriaus. Tai koreliuoja su mechaninių savybių tyrimo rezultatais – skirtumai tarp popierių ir atspaudų savybių taip pat nedideli. Tai sietina su tuo, kad ofsetiniai dažai yra aliejinės prigimtys ir mažai sąveikauja su popieriumi, o santykinai plonas dažų sluoksnis nedaro didesnės įtakos spaudinio savybėms. Tiesa, nuo popieriaus paviršiaus topografijos priklauso dažų sluoksnio struktūra (3.47 pav.), bet jos įtaka spaudinio savybėms (bet ne išvaizdai) yra nedidelė.

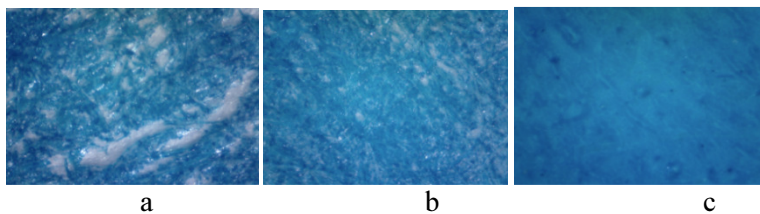


3.46 pav. Ofsetinių spaudinių CIE L^* a^* b^* spalvų koordinatės.

Popierius: 1 – *Maxi offset* 100 g/m², 2 – *4CC* 100 g/m²,
3 – *Galerie art silk* 150 g/m²

Fig 3.46. CIE L^* a^* b^* coordinates of offset prints. Papers:

1 – *Maxi offset* 100 g/m², 2 – *4CC* 100 g/m², 3 – *Galerie art silk* 150 g/m²



3.47 pav. Ofsetinių spaudinių, 100% CYAN paviršiaus nuotraukos.

Popierius: a – *Maxi offset* 100 g/m², b – *4CC* 100 g/m²,
c – *Galerie art silk* 150 g/m², Didinimas 40^x

Fig. 3.47. Surface photos of offset prints, 100% CYAN.

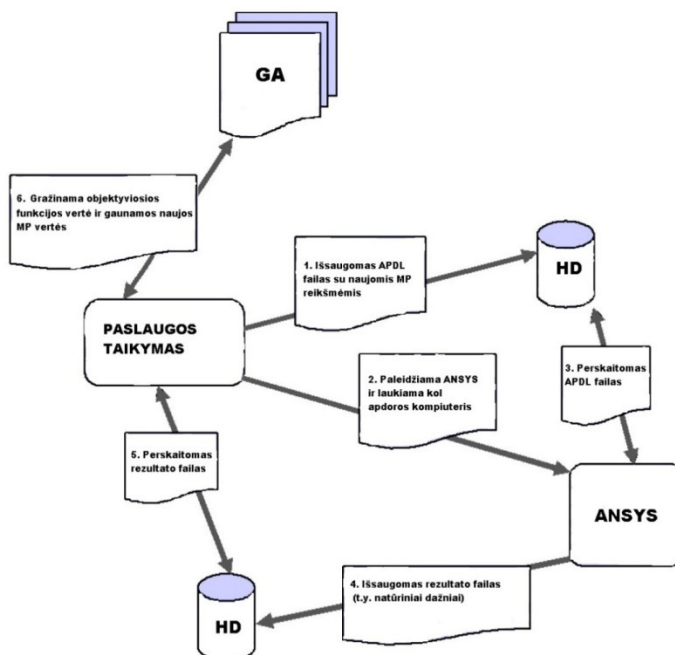
Papers: a – *Maxi offset* 100 g/m², b – *4CC* 100 g/m²,
c – *Galerie art silk* 150 g/m², magnification 40^x

3.2. Spaudinių mechaninių charakteristikų nustatymas

Sudėtingų medžiagų, sudarytų iš kelių sluoksnių, mechaninės charakteristikos gali būti modeliuojamos ir identifikuojamos naudojant baigtinių elementų metodikas (BEM). Tokios metodikos buvo sėkmingai panaudotos, pavyzdžiui, modeliuojant popierių dinamines charakteristikas – tamprumo modulius (Kulachenko 2007ab), tiriant dvisluoksnes struktūras (Ragauskas ir Skukis 2007, Ragauskas ir Belevičius 2009, Ragauskas 2010). Spaudiniai yra keliasluoksni struktūra, kurios komponentų mechaninių charakteristikų nustatymas yra kompliktuotas, todėl yra tikslinga spaudinių mechaninių charakteristikų identifikavimui panaudoti esamas BE metodikas, jas modifikavus ir kartu derinant su vibraciniais metodais.

3.2.1. Atvirkštinis inžinerijos uždavinys

Popieriaus ir spaudinių kaip kompozicinių medžiagų tamprumo rodiklių skaičiavimų eiga pateikta (3.48 pav.).



3.48 pav. Tamprumo rodiklių nustatymo algoritmo schema

Fig. 3.48. Scheme of algorithm of identification of elasticity properties

Darbe pritaikyta technologija, kurią sudaro eksperimentiniai vibraciniai bandymai ir skaičiavimai matematinio tiriamos medžiagos modelio pagalba, taikant genetinius algoritmus. Bandinio tikriniai virpesių dažniai ir atitinkamos modų formos nustatomos atlikus vibracinį testą. Matematiniam modelyje tamprumo rodikliai keičiami tol, kol jo tikriniai virpesių dažniai sutampa su vibracinio bandymo metu gautais dažniais (matematiniam modelyje naudoti tamprumo rodikliai atitinka tikrąsias bandinio vertes). Tokiu būdu yra sprendžiamas atvirkštinis inžinerinis uždavinys. Nustatyti tamprumo rodikliai atitinka viso bandinio, bet ne tam tikro jo sluoksnio parametrus. Buvo atlikta eksperimentų su skirtingais bandiniais: popieriaus bei su spaudiniais – tas pats popierius, dengtais dažų sluoksniu. Papildomai spaudiniai buvo lakuoti, ir tokiu būdu susidarė trisluoksnių kompozicinė medžiaga.

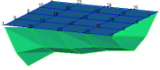
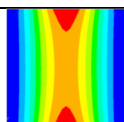
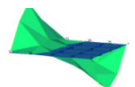
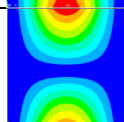
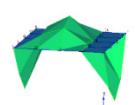
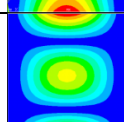
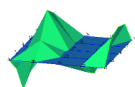
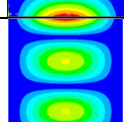
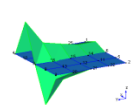
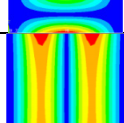
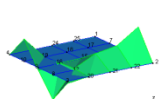
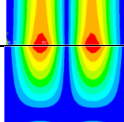
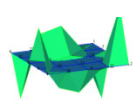
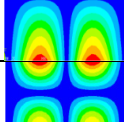
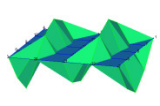
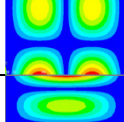
3.2.2. Spaudinių tamprumo moduliai

Tamprumo moduliai buvo nustatomi popieriams *Maxi offset* ir lazeriniam lakuojamam spaudiniui ant popieriaus *Maxi offset* 80 g/m². Rezultatai lyginami su tiesioginio tamprumo modulio matavimo rezultatais (3.1.1 poskyris).

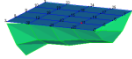
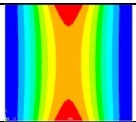
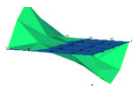
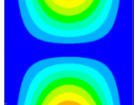
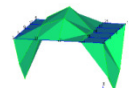
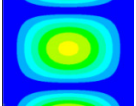
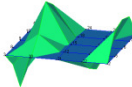
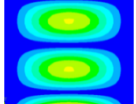
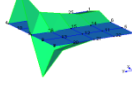
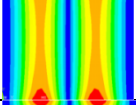
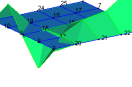
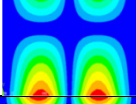
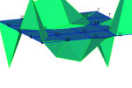
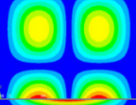
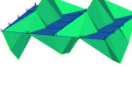
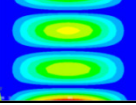
Popieriaus *Maxi offset* 80 g/m² lapo vibracinių bandymų rezultatai ir jų palyginimas su matematinio modelio tikriniais dažniais pateikiami 3.9 lentelėje. Tik keletas tikrinių dažnių buvo įtraukta į nustatymą, kadangi visos dažnių sekos nustatymas yra sudėtingas ir ilgai trunkantis procesas. Šis modų skaičius pasirinktas neatsitiktinai – pirmosios aštuonios modos teikia identifikavimui daugiausia informacijos, jų užtenka patikimam tamprumo rodiklių nustatymui. Reikia pastebėti, jog natūralaus ir skaitinio eksperimento rezultatai sutampa pakankamai gerai (dažnių skirtumas Δ daugiausiai, išskyrus 2 modą, yra keli nuošimčiai). Tas rodo, jog medžiagos matematinis modelis suformuluotas tinkamai, t. y. matematinis modelis susietas su tikru bandiniu ir gali būti naudojamas tolimesniuose eksperimentuose su sudėtingesniais bandiniais.

Identifikuotos tamprumo modulio vertės: išilgine kryptimi tamprumo modulis yra 1,22 GPa, skersine – 0,33 GPa. Ši išilginės krypties tamprumo modulio vertė yra pakankamai arti tiesiogiai nustatyta artimo pagal savybes popieriaus 4CC tamprumo modulio vertei esant mažam tempimo greičiui – 2,3 GPa (3.1.1 poskyris). Galima daryti prielaidą, kad sutapimas gali būti geresnis matuojant dar prie mažesnio tempimo greičio. Popieriaus *Maxi offset* 80 g/m² su dažų ir lako danga vibracinių bandymų rezultatai ir jų palyginimas su matematinio modelio tikriniais dažniais pateikiami 3.10 lentelėje.

3.9 lentelė. Popieriaus *Maxi offset 80 g/m²* tikriniai dažniai, Hz**Table 3.9.** Eigenfrequencies in Hz of paper *Maxi offset 80 g/m²*

Moda	Dažnis eksperimentinis, f^{NE}	Modos forma eksperimentinė	Dažnis skaičiuotas, f^{BEM}	Modos forma skaičiuota	Eksperimentinių ir skaičiuotų dažnių skirtumas, %
1	12		12,8		-6,25
2	14		15,6		-10,26
3	18		18,6		-3,23
4	26		26,6		-2,26
5	34		34,1		-0,29
6	45		45,8		-1,75
7	55		57,9		-5,01
8	59		61,5		-4,07

3.10 lentelė. Popieriaus *Maxi offset 80 g/m²* su tonerio ir lako sluoksniu tikriniai dažniai, Hz
Table 3.10. Eigenfrequencies in Hz of paper *Maxi offset 80 g/m²* with toner and varnish layer

Moda	Dažnis eksperimentinis, f^{NE}	Modos forma eksperimentinė	Dažnis skaičiuotas, f^{BEM}	Modos forma skaičiuota	Eksperimentinių ir skaičiuotų dažnių skirtumas, %
1	8		7,1		+11,30
2	11		10,7		+2,80
3	13		12,8		+1,56
4	18		18,8		-4,26
5	26		28,9		-10,03
6	31		30,1		+3,0
7	42		43,8		-4,11
8	44		46,4		-5,17

Šie rezultatai rodo, kad siūlomas BE metodas jį derinant su eksperimentiniais vibraciniais metodais, suteikia galimybę nustatyti popieriaus ir spaudinių tamprumo modulius, tačiau, lyginant tiesiogiai išmatuotas ir nustatytas skaitiniais metodais vertes reikia atsižvelgti į tamprumo modulių priklausomybę nuo deformacijos greičio, pavyzdžiui, kintant tempimo greičiui nuo 0,5 iki 5 mm/min tamprumo modulis didėja iki 2 kartų (3.1.1 poskyris).

3.2.3. Spaudinių tikrinių virpesių dažnių nustatymo problema

Buvo pastebėta, kad popieriaus tikrinius dažnius eksperimentiškai nustatyti įmanoma tik jį įtempus. Ankstesniuose darbuose (Edwins 1986, De Visser 1997, Ragauskas 2009) jau buvo pritaikyta atvirkštinio inžinerinio uždavinio sprendimo metodika nustatant bandinių tamprumo rodiklius, bet eksperimentuojama buvo su stiklo ir anglies pluošto medžiaga, padengta epoksidu. Toks kompozitas pasižymi didelėmis tamprumo rodiklių vertėmis lyginant su popieriumi. Popieriai pasižymi mažesniu tamprumo savybėmis, ir juntamas tamprumo rodiklių vertes galima pajusti tik prie tam tikrų pradinių įtempių, kitaip tariant, dirbtinai sustandinant bandinį, kad virpinant jis pradėtų virpėti. Tada, atliekant vibracinę analizę, dažniausia problema, su kuria yra susiduriama – reikiamas spaudinio įtempimas. Bandymai su spaudiniais parodė, kad didėjant įtempimui yra lengviau nustatyti ir spaudinių tikrinius dažnius. Šiuo tikslu šiame darbe tiriami įvairūs bandiniai, kurių įtempis buvo didinamas nuo 200 N/m iki 2000 N/m kas 200 N/m.

Skirtingų bandinių pirmosios aštuonios modos stabilizavosi skirtingose įtempių ribose. Pirmojo bandinio, kartono *Arktika* 275 g/m², tyrimo rezultatuose (3.49 pav.) galime matyti, jog modos stabilizavosi pasiekus 1800 N/m įtempį. Tokiu būdu galima teigti, jog spaudiniai ant šios rūšies kartono turėtų būti įtempiami ne mažesne nei 1800 N/m jėga.

Antrojo bandinio, kreidinio popieriaus *Galerie art silk* 150 g/m², eksperimento rezultatai parodė, jog stabilūs modalinės analizės rezultatai gaunami bandinį įtempiant ne mažesne nei 400 N/m jėga. Tuo tarpu įtempimui pasiekus 1200 N/m bandinys pradeda irti (3.50 pav.). Atlikti bandymai ir su likusiais skirtingais spaudiniais, padengtais vienodo storio dažų sluoksniu. Nustatyta, jog, norint gauti patikimus analizės rezultatus, t. y. tinkamai nustatyti pirmąsias aštuonias modos, bandiniai turi būti paveikiami mažiausiais tokiais įtempiais:

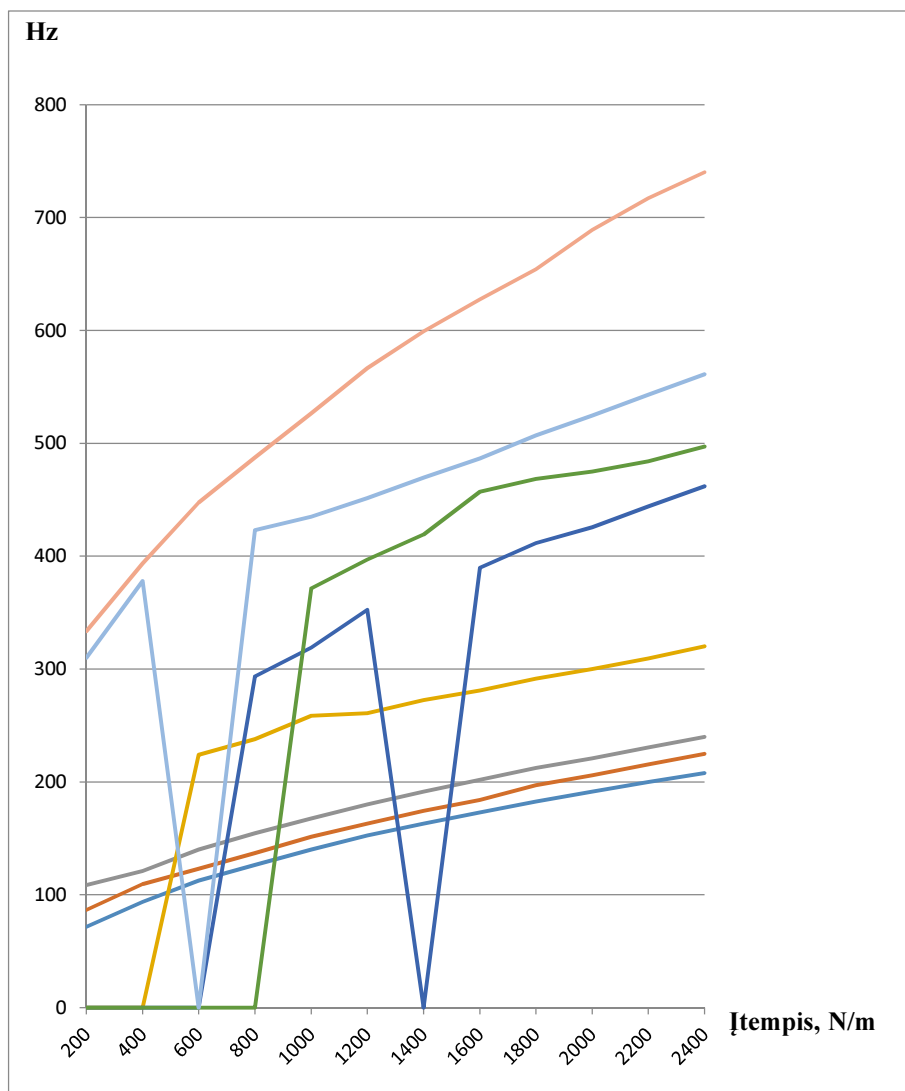
Kartonas *Arktika* 275 g/m² – 1800–2000 N/m;

Kreidinis popierius *Galerie art silk* 150 g/m² – 400–800 N/m;

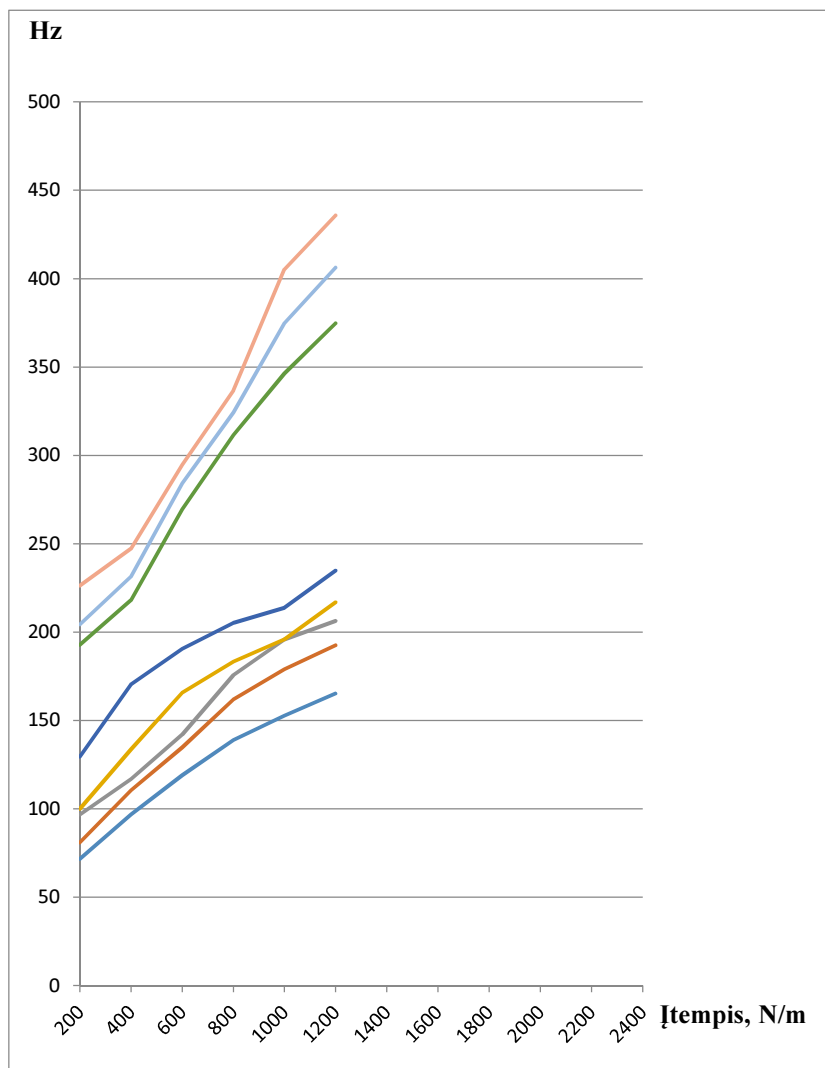
Nekreidinis popierius *4CC* 200 g/m² – 1400–2400 N/m;

Kartonas *Arktika* 230 g/m² – 1800–2400 N/m;

Nekreidinis popierius *4CC* 280 g/m² – 2000–2400 N/m.



3.49 pav. Nustatyti kartono *Arktika* 275 g/m² tikriniai dažniai
 Fig. 3.49. Identified eigen-frequencies of cardboard *Arktika* 275 g/m



3.50 pav. Nustatyti kreidinio popierius *Galerie art silk* 150 g/m² tikriniai dažniai

Fig. 3.50. Identified eigen-frequencies of coated paper *Galerie art silk* 150 g/m²

Toliau su minėtais bandiniais atlikti vibraciniai testai ir skaičiavimai BEM pagal metodiką, tapačią kaip su bandiniais 3.2.2 skirsnyje, esant įtempiams, kada virpersių modos nustatomos stabiliai. Rezultatai pateikiami 3.11 lentelėje.

3.11 lentelė. Identifikuoti tamprumo rodikliai kitų rūšių popieriams

Table 3.11. Identified elasticity parameters for other papers

Tamprumo rodikliai	Popierius be spaudos	Kartonas <i>Arktika</i> 280 g/m ²	Kreidinis popierius <i>Galerie art silk</i> 150 g/m ²	Nekreidinis popierius <i>4CC</i> 200 g/m ²	Kartonas <i>Arktika</i> 230 g/m ²	Nekreidinis popierius <i>4CC</i> 280 g/m ²
E^1 , GPa	1,10	1,94	1,36	2,35	2,28	2,08
E^2 , GPa	0,39	0,87	0,57	0,36	0,28	0,69
Naudotas įtempis, N/m	-	2000	600	1800	2000	2200

Rezultatai rodo, kad naudojant siūlomą tamprumo modulių nustatymo metodą reikia parinkti nustatyti tas įtempio vertės, esant kurioms popierius ir spaudiniai virpa stabiliai. Šios įtempio vertės gali būti naudojamos, reguliuojant juostos įtempį spausdinimo mašinose, kad būtų užtikrintas stabilus popieriaus (spaudinio) juostos judėjimas. Įprastai spausdinimo mašinų gamintojai numato tik preliminaras popieriaus įtempio vertes.

3.3. Trečiojo skyriaus išvados

1. Fleksografinių, rašalinių, lazerinių ir ofsetinių spaudinių dažų sluoksnis keičia, lyginant su popieriumi, spaudinių tamprumines savybes priklausomai nuo spaudos būdo: rašalinių spaudinių tamprumo modulis mažėja (iki 35%), lazerinių spaudinių – beveik nesikeičia.

2. Spaudinių ir popieriaus tamprumo modulis priklauso nuo tempimo greičio ir mažėjant greičiui modulio vertės mažėja: didinant tempimo greitį nuo 1 iki 5 mm/min, tamprumo modulis padidėjo 1,5–2 kartus. Stebėti pokyčiai aiškunami spaudinių ir popieriaus deformacijos ypatybėmis. Deformacija yra netiesinio tamprumo.

3. Spaudinių ir popieriaus atsparumas tempimui priklauso nuo tempimo greičio – didėjant greičiui trūkio įtempis didėja: didinant tempimo greitį 20 kartų, trūkio įtempis didėja daugiau kaip 5 kartus. Stebėti pokyčiai aiškinami spau-

dinių ir popieriaus deformacijos ypatybėmis. Deformacija yra netiesinio tempurumo.

4. Fleksografinių, rašalinių, lazerinių ir ofsetinių spaudinių dažų sluoksnis keičia jų atsparumą tempimui:

- fleksografinių spaudinių atsparumas tempimui abiem popieriaus kryptimis yra didesnis (iki dviejų kartų) už atitinkamo popieriaus atsparumą tempimui,
- rašalinių spaudinių atsparumas tempimui yra mažesnis (kai kurioms popieriaus rūšims siekia 16%) už atitinkamo popieriaus atsparumą tempimui,
- lazerinių spaudinių atsparumas tempimui yra didesnis (iki 20%) už atitinkamo popieriaus atsparumą tempimui,
- ofsetinių spaudinių atsparumas tempimui mažai skiriasi (1–3% ribose) nuo atitinkamo popieriaus atsparumo tempimui.

Spaudinių, gautų skirtingais spaudos būdais, atsparumo tempimui kaita aiškinama dažų sąveikos su popieriaus paviršiumi ypatybėmis.

5. Fleksografinių, rašalinių, lazerinių ir ofsetinių spaudinių dažų sluoksnis keičia spaudinių atsparumą daugkartiniam lankstymui:

- fleksografinių spaudinių atsparumas lankstymui priklauso nuo dažų sluoksnio storio – esant mažam storiui (aniloksinio volelio plotinis tūris $4,3 \text{ cm}^3/\text{m}^2$, kas atitinka dažniausiai naudojamą spausdinant) atsparumas lankstymui yra didesnis (iki 2 kartų), esant didesniai storiui ($10,2\text{--}39,1 \text{ cm}^3/\text{m}^2$) – mažėja lyginant su popieriumi beveik du kartus,
- rašalinių spaudinių ant popieriaus atsparumas lankstymui yra mažesnis apie 40%, o kartonų – didesnis (apie 30%) už atitinkamą popierių ar kartoną,
- ofsetinių spaudinių atsparumas lankstymui yra mažesnis (paklaidų ribose panašus į popieriaus) už atitinkamų popierių atsparumą lankstymui,
- lazerinių spaudinių atsparumas lankstymui yra didesnis 25% už atitinkamo popieriaus atsparumą lankstymui.

6. Spaudinių šiurkštumo pokytis priklauso nuo spaudos būdo: rašalinių ir fleksografinių spaudinių šiurkštumas yra didesnis už atitinkamo popieriaus šiurkštumą (iki 2 kartų), o lazerinių bei ofsetinių – mažesnis (priklausomai nuo dažų kinta nuo 2 iki 40%).

7. Visų tirtų spaudinių statinės ir kinetinės trinties koeficientai mažėja didėjant apkrovai, spaudinių trinties savybes lemia adhezinės jėgos, o nelygumų deformacijos poveikis yra mažesnis.

8. Spaudinių ir popierių trintis plokštuma – plokštuma yra nereguliaraus „prilipimo – slydimo“ tipo.

9. Rašalinių, fleksografinių ir lazerinių spaudinių trintis yra didesnė už popieriaus trintį (didėjimas svyruoja nuo 10 iki 35%, priklausomai nuo spaudos būdo), o ofsetinių atspaudų – mažesnė (apie 30%). Tai aiškina ma skirtinga dažų sąveika su popieriaus paviršiumi.
10. Spaudinių, išspausdintu tais pačiais dažais, spalva priklauso nuo dažų sąveikos su popieriaus paviršium ypatumų – dažų įsigėrimo, susidariusios sausų dažų sluoksnio paviršiaus morfologijos.
11. Siūlomas patobulintas tamprumo rodiklių nustatymo būdas parodė, kad galima tirti popieriaus ir spaudinių mechanines savybes, esant dviem ir daugiau dengiamųjų spaudinių sluoksnių. Identifikuotos tamprumo rodiklių reikšmės yra artimos, gautoms tiesioginiais matavimais.
12. Naudojant siūlomą tamprumo modulių identifikavimo metodą, reikia parinkti tas įtempio vertes, kurioms esant popierius ir spaudiniai virpa stabiliai. Šios įtempių vertės turėtų būti naudojamos ir spausdinimo mašinose, kad būtų užtikrintas stabilus popieriaus (spaudinio) juostos judėjimas.

Bendrosios išvados

1. Spaudiniai, gauti įvairiais spaudos būdais ant popieriaus, yra kompozicinės medžiagos, sudarytos iš kelių komponentų. Literatūros apžvalga rodo, kad kompozicinių medžiagų, susidarančių spaudos procese, savybės yra beveik netirtos. Kadangi nuo spaudinių savybių priklauso spausdintųjų produktų, ypač pakuočių, kokybė, yra tikslinga atlikti spaudinių išsamius tyrimus.

2. Spaudinių, kaip kompozicinių medžiagų, gaunamų spausdinant skirtingais būdais ant skirtingų popierių, charakteristikų nustatymui būtina atlikti kompleksinį mechaninių, atsparumo tempimui bei lankstymui, trinties ir spalvos savybių tyrimą. Tyrimui tikslinga naudoti standartines popieriaus pramonės metodikas, jas praplečiant.

3. Spaudinių modeliavimas skaitmeniniais metodais, naudojant baigtinių elementų (BE) metodus, genetinius algoritmus kartu su eksperimentiniais vibraciniais metodais ir sprendžiant atvirkštinį inžinerinį uždavinį, leidžia nustatyti spaudinių tamprumo rodiklius.

4. Nustatyti šie spaudinių ypatumai:

- spaudinių tamprumo ir atsparumo tempimui savybės priklauso nuo deformacijos greičio – didinant tempimo greitį nuo 0,5 iki 5 mm/min tamprumo modulis didėja iki 2 kartų ir atitinkamai didėja trūkio įtempis; tai aiškinama tuo, kad spaudinių deformacija yra netiesinio tamprumo,

- fleksografinių, rašalinių ir lazerinių spaudinių statinė bei kinetinė tarpusavio trintis priklauso nuo apkrovos ir yra didesnė, lyginant su trintimi tarp popierių; trintis tarp ofsetinių spaudinių yra mažesnė už popieriaus trintį. Stebėti pokyčiai aiškinami tuo, kad popieriaus ir spaudinių trintį daugiausia lemia adhezijos jėgos,

- spaudinių paviršiaus šiurkštumo kaita, lyginant su atitinkamo popieriaus šiurkštumu, priklauso nuo spaudos būdo – fleksografiniai ir rašaliniai dažai didina šiurkštumą iki 2 kartų, o ofsetiniai ir lazerinio spausdinimo dažai mažina,

- spaudinių spalva priklauso ne tik nuo popieriaus spalvos, bet ir nuo sudariusio dažų sluoksnio morfologijos, kuri priklauso nuo spaudos būdo.

5. Modeliuojant spaudinius modifikuotu baigtinių elementų metodu, nustatytos popieriaus ir spaudinių tamprumo savybės esant dviem ir daugiau dengiamųjų sluoksnių; modeliavimo rezultatai atitinka vertes, gautas matuojant tiesiogiai.

6. Fleksografinių, rašalinių, lazerinių ir ofsetinių spaudinių ant įvairių popierių mechaninių, atsparumo, trinties bei spalvinių savybių tyrimas parodė, kad spaudiniai yra sudėtinga kompozicinė medžiaga, kurios savybės pagrindinai lemia dažų ir popieriaus paviršiaus sąveika. Kompleksinis spaudinių tyrimas išryškino jų savybių kaitos, lyginant su atitinkamais popieriais, ypatybes ir gautos priklausomybės leido padaryti prielaidas apie tų savybių kaitos priežastis (mechanizmus).

Literatūra ir šaltiniai

4CC Technical Data Sheet [interaktyvus], [žiūrėta 2014 m. gegužės 22 d.]. Prieiga per internetą: <<https://www.antalys.co.uk/business/catalog.htm?mhId=165065997&nodeName=4CC>>.

Abazoriūtė, D. 2013. *Popieriaus paviršiaus ir mechaninių savybių kaitos spausdinant fleksografiniais dažais tyrimas*: baigiamasis magistro darbas. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius. 81 p.

Adams, J. M., and Dolin, P. A. 2002. *Printing technology*. Fifth edition. Delmar.

ASTM D-1894-75. *Test for Static and Kinetic Coefficients of Friction of Plastic Film and Sheeting*. p. 1–15.

Back, E. 1991. Paper-to-paper and paper-to-metal friction, *Kona*, TAPPI, p. 49–65.

Beeck, J.V. *Paper: a closer study*, Bachelor final project, Eindhoven, 2008.

Berman, A. D., Ducker, W. A. and Israelachvili, J. N. 1996. Origin and Characterization of Different Stick-Slip Friction Mechanisms, *Langmuir*, 12(19), p. 4559–4563.

Borch, J., Lyne, M. B., Mark, R. E., Habeger Jr., C. C. 2002. *Handbook of Physical Testing of Paper*. Volume 2, Second Edition, Revised and Expanded. Marcel Dekker Inc., New York, USA, p. 499.

Borch, J. 1993. Surface characterization of communication papers, in: *Products of Papermaking, Tenth Fundamental Research Symposium*, Oxford, UK, p. 209–236.

- Bristow, A. 1967. Liquid Absorption into Paper During Short Time Intervals. *Svensk Papperstidning* 19(70): 623-629.
- Bristow, A. 2009. The Surface of Paper, in Ek, M., *et al. Pulp and Paper Chemistry and Technology*. Berlin: Walter de Gruyter GmbH & Co, p. 209–232.
- Burton, J. 2008. A Primer on UV-Curable Inkjet Inks, *SGIA Journal* 2(12).
- Castrejón-Pita, J. R., *et al.* 2013. Future, Opportunities and Challenges of Inkjet Technologies. *Atomization and Sprays* 6(23), p. 541–565.
- Chen, S. C. 2009. *Effects of paper properties on xerographic print quality*, Master thesis, Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry University of Toronto, ISO 1924-1:1992(E). Determination of tensile properties.
- Digigreen Brochure* [interaktyvus], [žiūrėta 2014 m. gegužės 22 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.printefficiently.com/PDF%20digital/ANTALIS%20PDFs/Digigreen-brochure-UK-8.pdf>.
- Eid, A. H. 2008. Characterization of Mottle and Low Frequency Print Defects, *SPIE-IS&T*, Vol. 6808(9), p.1-12.
- Enomae, T., Yamaguchi, N., Onabe, F. 2006. Influence of coating properties on paper-to-paper friction of coated paper, *Journal of Wood Science*, Volume 52, Issue 6, p. 509–513.
- Fellers, Ch. 2009. The Structure of Paper and its Modelling. *Pulp and Paper Chemistry and Technology*. Berlin: Walter de Gruyter GmbH & Co, p. 1–24.
- Flexography: Principles and Practices, 5th Ed. (2001). FFTA, Ronkonkoma.
- Foundation of Flexographic Technical Association, 1999. *Flexography: principles & practices 5th edition*. Ronkonkoma, N. Y.
- Forseth, T., Wiik, K. and Helle, T. 1997. Surface roughening mechanisms for printing paper containing mechanical pulp. *Nordic Pulp and Paper Research Journal* no. 1, p. 67–71.
- Frimova A.; Pekarovicova A.; Fleming P.D; Pekarovic J. 2005. Ink Stability During Printing, *Taga juornal* VOL. 2. Swansea printing technology.
- Garoff, N. 2002. *The Friction between Paper surfaces*. Doctoral thesis, Stockholm, p. 1–3.
- Garoff, N., Nilvebrant, N. O., Fellers, C. 2002. Friction of linerboard based on recycled fiber, *Journal of Applied Polymer Science*, Volume 85, Issue 7, p. 1511–1520.
- Hamazaki, T.; Morita, N. 2009. Ejection Characteristics and Drop Modulation of Acoustic Inkjet Printing Using Fresnel Lens, *Journal of Fluid Science and Technology* 1(4), p. 25–36.
- Hallback N., Girlanda O., Tryding J. 2006 . Finite element analysis of ink-tack delamination of paperboard, *International Journal of Solids and Structures*, Elsevier, Vol. 43, No. 5, p. 899–912.

- Heilmann, J. and Lindquist U. 1998. Significance of Paper Properties on Print Quality in CIJ Printing. *ISST's NIP 14: International Conference on Digital Printing Technologies*.
- Holík H. 2013. *Handbook of Paper and Board*, 2nd Revised and Enlarged Edition, 2 Volume Set, Wiley-WCH, ISBN: 978-3-527-33184-0.
- Hrehorova, E.; Sharma, A.; Fleming, P. D. 2006. Color Reproduction Studies in RGB and CMYK Workflows Using Inkjet Printer Drivers and RIPs, in *TAGA 58th Annual Technical Conference. Vancouver: Taga Proceedings*, p. 159–171.
- Hudd, A. 2010. Inkjet Printing Technologies, in Sh. Magdassi. *The Chemistry of Inkjet Inks*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, p. 3–18.
- ISO 8791-4:2007. Paper and board. *Determination of roughness/smoothness (air leak methods) – Print -surf method*.
- Yang, C. F., Crosby, C. M., Eusfzai, A. R. K., Mark, R. E. 2003. Determination of paper sheet fiber orientation distributions by laser optical diffraction method, *Journal of Applied Polymer Science*, Volume 34, Issue 3, p. 1145–1157.
- Jianping, G., Luedtke, W. D., Gourdon, D., Ruths, M., Israelachvili J. N., Landman, U. 2004. Frictional Forces and Amonton's Law: From the Molecular to the Macroscopic Scale, *Journal of Physical Chemistry*, 108 (11), p. 3410–3425.
- Yokoyama T and K. Nakai, K. (2007). Evaluation of in-plane orthotropic elastic constants of paper and paperboard, *In proceeding of: 2007 SEM Annual Conference & Exposition on Experimental and Applied Mechanics*.
- Yoon S. Y. 2007. *Bonding material coated clay for improving paper properties*. Dissertation, Georgia Institute of Technology p. 5.
- Johansson, A., Fellers, C., Gundersson, D., Haugen, U. 1998. Paper Friction-influence of measurement conditions, *Tappi Journal*, 1998, 81:5, p. 175–183.
- Johansson, A., Fellers, C., Gundersson, D., Haugen, U. 1999. Paper Friction-influence of measurement conditions, *Tappi J.*, 81(5), p. 175–183.
- Johansson, K.; Lundberg, P., and Ryberg R. 2007. *A Guide to Graphic Print Production*. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey.
- Kalácska, G. 2013. An engineering approach to dry friction behavior of numerous engineering plastics with respect to the mechanical properties, *eXPRESS Polymer Letters*, 7(2), p. 199–210.
- Karlović, I., and Novaković D. 2011. Effect of different amounts on the surface roughness and print gloss of screen coated offset prints. *Journal of Imaging Science and Technology* 55(2): 020501-1020501-10.
- Ketoja, J. 2008. In Paper Physics. (ed. Niskannen, K.). Finnish Paper Engineers' Association/Paperi ja Puu Oy.
- Kibirkštis, E., Kabelkaitė, A. 2006. Research of paper/paperboard mechanical characteristics, *Mechanika* 3(59): p. 34–41.

- Kim J. and Anderson B. L. 2010. Image statistics and the perception of surface gloss and lightness. *J. Vision* 10(9), 3.
- Kipphan, H. 2001. *Handbook of Print Media: technologies and production methods*. Berlin, Springer, p.1207.
- Klimavičiūtė, R.; Getautis, V. 2008. Taikomosios dažų chemijos pagrindai. Kaunas: Technologija, p. 88.
- Kulachenko, A., Gradin, P., Koivurova, H. 2007a. Modeling the dynamical behavior of a paper web. Part I. Computers and Structures 85: p. 131–147. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruc.2006.09.006>.
- Kulachenko, A., Gradin, P., Koivurova, H. 2007b. Modeling the dynamical behavior of a paper web. Part II. Computers and Structures 85: p. 148–157. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruc.2006.09.007>.
- Kulachenko, A., Gradin, P., Uesaka, T. 2007c. Basic mechanisms of fluting formation and retention in paper. *Mechanics of Materials* 39, p. 643–663.
- Kulišauskaitė, M. 2013. Kartono paviršiaus ir mechaninių savybių kaitos spausdinant ofsetiniais ir fleksografiniais dažais tyrimas: baigiamasis magistro darbas. Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, p. 63.
- Kumar N., Bhardwaj N. K., Chakrabarti S. K. 2011. Influence of pigment blends of different shapes and size distributions on coated paper properties. *Journal of Coatings Technology and Research*, Volume 8, Issue 5, p. 605–611.
- Lamminmäki, T., Kettle, J., Puuko, P., Ketoja, J and Gane, P. 2010. The role of binder type in determining inkjet print quality. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, Vol. 25, p. 380–390.
- Landy M. S. 2007. Visual perception: A gloss on surfaces properties. *Nature* (London) 447, p. 158–159.
- Le, H. P. 1998. Progress and Trends in Ink-jet Printing Technology, *Journal of Imaging Science and Technology*, 1(42), p. 49–62.
- Lomond Catalog. 2009. Douglas: Lomond Trading Limited, p. 122.
- LST ISO 8295. Lithuanian Standard. *Plastics – Films and sheeting – Determination of the coefficient of friction*, p. 1.
- MacPhee J. 1998. *Fundamentals of Lithographic Printing*, Vol. 1: Mechanics of Printing, ISBN: 978 0883 62214 8, p. 3–60.
- Manoj K., Raghunandan S., Kshitij T., Alekhya V. M., Anup K. K., Sarang M., Kulvir S. 2013. *Synthesis of CIS Nanoink and Its Absorber Layer without Selenization*. Hindawi Publishing Corporation Conference Papers in Energy Volume 2013, Article ID 739532, 3 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2013/739532>
- Mark, R. E., et al. 2002. *Handbook of Physical Testing of Paper*. New York: Marcel Dekker Inc., p.1027.

Maxioffset Product Information [interaktyvus], [žiūrėta 2014 m. gegužės 22 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.polap.lv/uploads/files/maxi%20offset%20Sheets.pdf>>.

Myshkin, N. K. 2009. Adhesion and friction of polymers, *In Sinha, S.K. and Briscoe, B.J.(eds)*, Polymer Tribology, Imperial College Press, London, p. 3–37.

Moore, K. 2008. *The Effect of Papermaking Conditions on the Bulk and Roughness of Coated Wood-free Paper Containing Aspen High-yield Pulp*. Master of Applied Science Thesis, Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry, University of Toronto.

Morsy, F. A., El-Sherbiny, S. 2004. Mechanical properties of coated paper: influence of coating properties and pigment blends. *Material Science*, Springer Science, vol.39, Issue 24, p. 7327–7332

Niskannen K. 2008. *Paper physics*. Finnish Paper Engineers' Association/Paperi ja Puu Oy, pg. 12, p. 106–107.

Pauler N. Paper Optics. 2002. Lorenzen Wettre.

Printing plate, anilox roller [interaktyvus], [žiūrėta 2014 04 18]. Prieiga per internetą: <http://www.gallus-group.com/en/desktopdefault.aspx/tabid-367/533_read-1509/>

Ragauskas, P. 2010. *Identification of elastic properties of layered composite materials*, Doctoral dissertation, Vilnius: Technika.

Ragauskas, P., Belevičius R. 2007. Identification of material properties of composite materials, *Aviation*, Vilnius, Lithuania, 1648–7788, 13 (4), p.109.

Ragauskas, P., Skukis E. (2007). Material properties identification. Comparison of two techniques, *Mechanika*, vol. 6(68), p. 39–44.

Ranjbartoreh A. R., Wang B., Shen X., and Wang G. 2011. Advanced mechanical properties of graphene paper, *Journal of applied physics* 6 January: Vol. 109 no. 014306.

Ridgway, P. L., Russo, R. E., Lafond, E., Jackson, T., Habeger, C. (2003). Laser Ultrasonic System for On-Line Measurement of Elastic Properties of Paper, *Journal of Pulp and Paper Science*, 29 (9) p. 289–293.

Romano, F. 2001. *The Future of Print in the 21st Century*. Eastman Kodak Company.

Sabaliauskas, A. 2013. *Popieriaus paviršiaus ir mechaninių savybių kaitos spausdinant skaitmeninių būdu tyrimas*: baigiamasis magistro darbas. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius. p.70.

Samuel, J., Edwards, P. 2010. Solvent-Based Inkjet Inks, in Sh. Magdassi. *The Chemistry of Inkjet Inks*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, p. 141–160.

Schaedler T. A., Jacobsen A. J., Torrents A., Sorensen A. E., Lian J, Greer J. R., Valdevit L., Carter W. B. 2011. Ultralight Metallic Microlattices, *Science* 18 November: Vol. 334 no. 6058, p. 962–965.

Schmid, Ch. 2010. Formulation and Properties of Waterborne Inkjet Inks, in Sh. Magdassi. *The Chemistry of Inkjet Inks*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, p. 123–140.

Shakhnovich, A., Belmont, J. 2010. Solvent-Based Inkjet Inks, in Sh. Magdassi. *The Chemistry of Inkjet Inks*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 141–160.

Schuman, T., Adolfsson, B., Wikstrom, M., Rigdahl M. 2005. Surface treatment and printing properties of dispersion-coated paperboard, *Progress in Organic Coatings*, Elsevier, Volume 54, Issue 3, p. 188–197.

Schuman, T., Karlsson A., Larsson J., Wikstrom M., Rigdahl M. 2005. Characteristics of pigment – filled polymer coatings on paperboard. *Progress in Organic Coatings*, Elsevier, Volume 54, Issue 4, p. 360–371.

Schuman, T., Wikstrom, M., Rigdahl M. 2004. Dispersion coating with carboxylated and cross-linked styrene-butadiene lattices 2. Effects of substrate and polymer characteristics on the properties of coated paperboard. *Progress in Organic Coatings*, volume 51, Issue 3, p. 228–237.

Sidaravičius, J., Montrimas, E. 2005. *Fizikiniai teoriniai informacijos registravimo ir spausdinimo procesų pagrindai*. Vilnius: Technika.

Singh, M., et al. 2010. *Inkjet Printing – Process and Its Applications*, *Advanced Materials* 22, p. 673–685.

Singleton, M. C., Allan, R. J. 1997. Factors influencing paper friction and its reproducibility: is third test best?, *Appita*, 50:6, p. 481–485.

TAPPI T 494. 2006. *Tensile properties of paper and paperboard (using constant rate of elongation apparatus)*. (Revision of T 494 om-01)

Thompson B. 2004. *Printing materials*. Science and technology. Leatherhead: Pira International. p. 194, 326–327.

TAPPI T 549 om-01. 2001. *Coefficients of static and kinetic friction of uncoated writing and printing paper by use of the horizontal plane method*. p. 1–9.

Valiulis A. V. 2005. *Naujos medžiagos*. Vilnius: Technika, p. 186.

Xerox. 2009. *Deducolo 8000/7000 Operator Manual*. Xerox Corporation Global Knowledge & Language Services 800 Phillips Road Building 845 Webster, New York 14580.

Ziminskaitė, A. 2013. Popieriaus paviršiaus ir mechaninių savybių kaitos spausdinant ofsetiniais dažais tyrimas: baigiamasis magistro darbas. Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, p. 67.

Раскин, А. Н., et al. 1989. *Технология печатных процессов*. Москва: Книга.

Шахельдян, Б. Н. и Загаринская. Л.А. 1998. *Полиграфические материалы*. Москва Книга.

Autorės mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Grigaliūnienė, S., Turla, V., Ragauskas, P., Kilikevičius, A., Sidaravičius, J. 2014a. Identification of prints elastic parameters, *Mechanika*, Kaunas: Technologija, ISSN 1392-1207. Vol. 20, nr. 5, p. 476–479 (ISI Web of Science).

Grigaliūnienė, S., Sidaravičius, J., Turla, V., Kibirkštis E., Jurkonis E. 2015. Investigation of the Friction of Flexographic and Inkjet Prints, *Nordic paper and pulp research journal, Finland*, ISSN 0283-2631, Vol. 30, nr.3, p. 519–526 (ISI Web of Science).

Ragauskas, P., Grigaliūnienė, S., Sidaravičius, D. J., Turla, V., Kilikevičius, A. 2015. Identification of the prints elastic parameters using vibrational methods, *Solid State Phenomena*, Mechatronic Systems and Materials VI, Zurich: Trans Tech Publications Ltd., ISSN 1012-0394, ISBN 9783038352273, Vol. 220–221, p. 91–96.

Markulytė (Grigaliūnienė), S., Turla, V., Sidaravičius, J. 2011. Lakavimo ultravioletiniu laku kokybės tyrimai, *Mokslas – Lietuvos ateitis = Science – future of Lithuania: mechanika, medžiagų inžinerija, pramonės inžinerija ir vadyba = mechanics, material science, industrial engineering and management*, Vilnius: Technika. ISSN 2029-2341. T. 3, nr. 6, p. 44–46.

Markulytė (Grigaliūnienė), S., Sidaravičius, J., Turla, V. 2012. Popierius ir atspaudai – kompozicinės medžiagos, *Mokslas – Lietuvos ateitis = Science – future of Lithuania: mechanika, medžiagų inžinerija, pramonės inžinerija ir vadyba = mechanics, material science, industrial engineering and management*, Vilnius: Technika. ISSN 2029-2341. T. 4, nr. 6, p. 528–532.

Grigaliūnienė, S., Abazoriūtė, D., Kulišauskaitė, M., Ziminskaitė, A., Sidaravičius, J., Turla, V. 2013b. Fleksografinių atspaudų mechaninės savybės, *Mokslas – Lietuvos ateitis = Science – future of Lithuania: mechanika, medžiagų inžinerija, pramonės inžinerija ir vadyba = mechanics, material science, industrial engineering and management*, Vilnius: Technika. ISSN 2029-2341. T. 5, nr. 6, p. 583–586.

Kituose recenzuojamuose leidiniuose

Grigaliūnienė, S., Sidaravičius, D. J., Turla, V., Vaitasius, K., Ragauskas, P. 2013a. Investigation of the friction of different paper and prints, *Mechanika'2013: proceedings of the 18th international conference*, 4, 5 April, 2013, Kaunas University of Technology, Lithuania. Kaunas: Technologija, ISSN 1822-2951. p. 71–76 (ISI proceedings).

Grigaliūnienė, S., Turla, V., Sidaravičius, J., Ragauskas, P., Kilikevičius, A. 2013c. Research of elastic parameters of paper and prints, *Vibroengineering PROCEDIA*, International conference "Vibroengineering – 2013", Druskininkai, Lithuania, 17–19 September 2013. Kaunas: Public Institution Vibroengineering (PIV). ISSN 2345-0533. Vol. 1, p. 1–4.

Grigaliūnienė, S., Sidaravičius, J., Turla, V. 2014b. Friction properties of laser and inkjet prints, *NIP30: 30th International conference on digital printing technologies*, September 7–11, 2014, Philadelphia, Pennsylvania: technical program and proceedings. Springfield: The Society for Imaging Science and Technology, ISSN 2169-446x. ISBN 9780892083121. p. 268–271.

Grigaliūnienė, S., Sidaravičius, J., Turla, V., Ragauskas, P., Kilikevičius, A. 2014d. Mode extraction problems of prints, *Mechanika'2014: proceedings of the 19th international conference*, 24–25 April, 2014, Kaunas University of Technology, Lithuania. Kaunas: Technologija, 2014. ISSN 1822-2951. p. 90–93.

Summary in English

Introduction

Formulation of the problem

The main factor determining the printing industry growth is the demand for printed products. If production of some printed products decreases in the case of others it increases, even new ones appear in the market (Romano 2010). Promotional and packaging printed products take even bigger place in the market. The packaging materials stand out with the variety of construction, design and the required specifications. These specifications are manifold: mechanical strength and resistance to various impacts, durability, sale able appearance and etc. Most of the requirements can be satisfied using new often composite materials and new technologies.

The concept of composite material can be used for paper and prints. Characteristic feature of composite material is that it has the main component – matrix, which determine the main properties of material, which can be changed intentionally by addition of other components. Such structure ensures paper unique printing and consumption properties, which can be changed in the large range by changing composition and structure of matrix as well as fillings and other additives. Print, which is made in printing process, is paper with part of its surface (depending on information printed) or sometimes full surface coated with ink layer. This structure is composite material and it has as compared with paper different mechanical, resistance and optical properties. Data about these properties of prints are very few and in many cases are absent. Since mechanical,

resistance, optical properties determine the properties of the final printed products they need to be investigated and the regularities of their changes should be determined.

Relevance of the thesis

In recent years, it has been observed that more than a half print volumes of periodical elements are decreasing in Lithuania, but despite that fact, the Lithuanian printing houses find new products and markets. We can see the increase of the number cardboard boxes manufactures, some companies invest in individualized printing possibilities. New activity fields, new printed products, recognition abroad and possibility to increase export show the competitiveness of Lithuanian printing houses. Lithuanian printers association *LISPA* data shows that last year export of printed production increased from 36% (2011) to 52% (2014), also we can see the growth tendency the demand of printing products in Lithuania. The part of the traditional printing products (newspapers, journals, books) becomes smaller and smaller in printing industry. On the other hand, statistics shows that in the last year boxes and other packages made 62%, books 47% and other periodical production only 32% of all printing production (*LISPA* 2015).

Perfect saleable appearance and good design are necessary for packages, but also their reliability and resistance to environmental or other impacts are very important. Besides, consumers often meet with problems during packaging, transporting or even demonstration of the printed products. It must be noted that inappropriate paper and printing procedure might result in low quality product. That is why it is necessary to determine experimentally resistance, tension, and colour characteristics of prints and to reveal the regularities of their change during printing. Also it is expedient to investigate friction properties not only between paper surfaces, but also between paper and print and between prints. Properties of complex objects like prints can be modelled using numerical methods. That is why it is necessary to evaluate them using finite element method and inverse engineering problem conception.

The object of research

The object of the research – mechanical, resistance, friction, colour, elasticity characteristics of prints as composite materials, made using traditional and digital printing technologies and different paper grades.

The aim of the thesis

The aim of the thesis is to investigate comprehensively characteristics of prints made with different printing technologies on different papers and comparing print properties with paper characteristics to reveal the regularities of the properties changes during printing.

The objectives of the thesis

In order to achieve the aim of the thesis, the following objectives have been set:

1. To investigate elasticity characteristics of prints made using different printing technologies on different papers.
2. To investigate break stress, folding endurance and deformation characteristics of prints made using different printing technologies on different papers and to determine their regularity changes.
3. To investigate friction properties of prints made using different printing technologies on different papers and to determine the friction change regularities.
4. To investigate colour characteristics of prints made using different printing technologies on different papers and to determine their changes regularities.
5. To determine paper and prints elastic parameters adapting finite element method (FEM) and using inverse engineering problem concept.

The research methodology

Analytical, numerical and experimental methods are applied in the present research. Prints made using lithography, flexography, ink-jet and laser printing technologies were investigated. Ink layer thickness, printing regime, colours were changed in printing processes. Different type, structure and grammage paper and cardboard were used in experiments. Structure and properties of prints were investigated experimentally. Modern experimental methods were used to investigate structure and properties of prints: colour properties were determined spectrometrically and microscopically, static and kinetic friction coefficients were determined using horizontal plane measuring device, elastic properties and tension resistance investigated using *Instron Electropulse E3000* device and dynamometer. Elastic parameters of prints were identified solving inverse engineering method, using finite element method and genetic algorithm.

Scientific novelty of the thesis

The following new for the material engineering science findings have been found:

1. Experimentally were determined mechanical characteristics of laser, ink-jet, offset and flexographic prints and revealed their dependencies on paper parameters, ink type and layer thickness.
2. Experimentally were determined friction properties of paper and prints and identified the role of the interaction between ink and paper. The dependence of friction coefficients on load was determined.
3. Experimentally were determined colour characteristics of prints and determined their change dependencies due to paper and ink interaction.
4. Elastic parameters of prints were identified solving inverse engineering problem using finite element method and genetic algorithm on the basis of experimental vibrational testing results.

Practical significance of the research findings

There were comprehensively investigated prints on the different paper grades and using most popular in Lithuania printing technologies. The investigation results should be used for the planning of the technological procedures for the particular printing jobs. The dissertation results should be also used in the design of packages and other printed products. Using thesis results it will be possible to produce packages and other products with lower roughness, increased strength and resistance to the rubbing. The results of the numerical modelling (regimes of the stabile vibrations) can be used for the adjusting of the paper web in multisectional printing presses.

Defended statements

1. Elastic, tensile and folding resistance, surface roughness and colour properties of the lithographic, flexographic and digital (laser and ink-jet) prints depend on the paper grade and printing technology.
2. Friction properties of the lithographic, flexographic and digital (laser and ink-jet) prints depend on the paper grade and printing technology: flexographic and ink-jet prints increase friction coefficients while lithographic and laser prints decrease friction coefficients.
3. Static and kinetic coefficients of the lithographic, flexographic and digital (laser and ink-jet) prints decrease with the load and this is because adhesion forces are predominant.
4. Proposed modified finite elements method combined with the experimental vibrational testing and using genetic algorithm for the resolving of the inverse engineering problem is suitable for the identification of the elastic properties of prints.

Approval of the research findings

10 publications on the subject of the dissertation are published: 2 articles – in the journals from Thomson ISI list with IF, 1 article – in conference proceedings (Thomson ISI proceedings), 7 publications – in other international data base.

14 presentations on the subject have been given in conferences at national and international level.

- 15–17th Conference of Young Scientists *Science – future of Lithuania*, Vilnius, Lithuania, 2012–2014.
- Conference of Young Scientists *Interdisciplinary investigations in physical and technical science* Vilnius, Lithuania 2014.
- Republican Lithuanian numerical mechanics seminar Vilnius, Lithuania, 2014.
- *Innovations in publishing, printing and multimedia technologies*: scientific-practical conference Kaunas, Lithuania 2013–2014.
- International conference *Mechanika* Kaunas, Lithuania 2013–2014.
- 9th and 10th International conference *Mechatronic Systems and Materials* Vilnius, Lithuania, 2013 and Opole, Poland, 2014.
- International conference *Vibroengineering* Druskininkai, Lithuania, 2013.

- International symposium *PTS symposium innovative packaging* Miunchen, Germany, 2014.
- 30th International conference *NIP30 Digital Printing/Digital Fabrication* Philadelphia, USA, 2014.

The structure of the dissertation

The dissertation consists of introduction, three Chapters, general conclusions and the list of references, author's publications of the on the topic of the dissertation, summary in English and annexes. The dissertation contains 140 pages excluding annexes, 5 equations, 74 figures, 14 tables and 91 references, 3 annexes.

1. Analyses of paper and prints mechanical and colour properties

Composite materials are materials composed from two or several components, with different structure or chemical composition, and these components form monolithic structure, which has one or more internal junctions. Paper consists from cellulose fibers, fillers, sizer or sizing layer on the surface(s), pigment layers etc. Such structure corresponds to composite material conception. Prints are even more complex composite structure.

Mechanical properties of prints determine many important properties of final printed products. Mechanical properties are also important in printing (second or other colours are printing not on paper but on print) and further print processing. State-of-art review revealed that mechanical properties of prints are almost not investigated, except few episodic investigations. The lack of the investigations of the mechanical properties of prints is caused because it was assumed usually that thin (1–3 μm) ink layer practically do not influence the thick (70–130 μm) paper mechanical characteristics. Having in the mind that inks were oil base this assumption is almost correct for the letterpress and partially for lithographic prints. Expanding high quality flexography with water based ink (Flexography 2001, Kipphan 2002), more and more using ink-jet mostly with water based ink, this assumption, that ink does not change paper mechanical properties requires separate complex investigation. In laser (electrophotography) toner layer is much thicker (10–15 μm) and it should have bigger influence.

Colour characteristics of prints are mostly investigated in connection with print quality, especially investigating screen dots gain related to printing pressure and ink penetration into paper (Kipphan 2002, Johansson *et al.* 2007, Раскин *et al.* 1989). Ink penetration in to paper is especially important for high quality ink-jet printing (Laminmäki *et al.* 2010, Heilmann *et al.* 1998), and even special papers are created for ink-jet.

Paper properties play a great role in the print properties. Main mechanical and optical properties of papers are submitted by paper manufactures. Additionally paper properties are examined widely and comprehensively. Problem is to determine properties of

prints on paper as composite materials. It is reasonable to use for the investigation of prints methods determined in the paper standards (ISO, TAPPI). This will allow to compare paper and print and to reveal the regularities of the property change during printing.

Besides direct measurements it is expedient to investigate prints using numerical methods, which allow getting more information. Finite element method (FEM) is often used for complex structures investigation. Identification of elastic parameters using FEM is combined with experimental vibrational testing (Edwins 1986, De Visser 1997, Hwang 2006, Ragauskas 2009). Natural frequencies and corresponding mode shapes are obtained from vibrational tests. Elastic parameters are changed in numerical model until dynamical properties correspond to results of vibrational tests, thus is solved inverse engineering problem. Characteristics of paper web were also successfully investigated using these methods. Kulachenko with co-authors (Kulachenko 2007abc) adjusted FEM (choose appropriate shell and etc.) to investigate the wrinkle of paper web. Important is that this method can be used not only for the uniform web, but also for paper with disorderly distributed spots of with different properties (different amount of moisture). This result showed FEM possibility to identify not only continuous prints elastic characteristics, but also prints.

2. Research methodology of the paper and prints used materials

Ink deposited on paper in printing process interacts with paper surface and this interaction depends on paper structure. Then papers of different structure and cardboards were used in this work. Eight different grades and grammage coated and uncoated papers and cardboards were tested. Prints are paper coated with continuous ink layer (solid) using traditional and digital printing technologies.

Flexographic prints. Prints for experiments were made coating paper surface with different thickness flexographic ink layer. *K Lox* manual device was used with different surface volume anilox rollers. Ink layer thickness was estimated only by anilox roller surface volume, not excluding ink left on walls of cells.

Lithographic prints. Lithographic prints were made using ink testing device *IGT CI*. Lithographic prints were made with ink layer thickness averages: 1 – 0.91 μm , 2 – 1.86 μm , 3 – 2.56 μm , 4 – 3.47 μm .

Digital prints. In order to make prints with different thickness toner layer, using ink-jet and laser print types, one toner layer (100 % K) and four toner layers (100 % CMYK) print were made.

Methods. The properties of prints were determined comprehensively. Elastic, tensile, folding, surface roughness, friction properties and colour were investigated using standard paper or modified testing methods. Two tensile testers, PPS roughness tester, spectrophotometer, horizontal friction tester were used. Colour was measured in CIE $L^* a^* b^*$ space

Numerical modelling of prints was made using FE method together with vibrational tests. For the identification of elastic parameters was used solution of the inverse engi-

neering problem. On the basis of the natural experiment data the elastic properties were identified solving the optimization problem for the FE model:

$$F(X) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{f_i^{BEM} - f_i^{NE}}{f_i^{NE}} \right)^2 \quad (S1)$$

Where F is object function of variables and $X = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_m]$ is optimization variable: $x_i \leq x_i \leq x_i$ $i = 1, 2, 3, \dots, m$. Target variables are Young's module and Poisson ratio: $X = [E_1, E_2, \nu_{12}]$.

3. Mechanical and optical properties of prints

Paper in printing machines and prints after first printing section is stretched and elastic and deformation properties influences not only run of printing machine. Printing quality and first of all colour register, which has to be better than 0.1 mm, also depends on these parameters.

Elastic properties. Paper and print elastic (Young's) modulus, tensile stress, tensile strain and Poisson ratio are important in printing process. Tensile stress dependence on deformation is measured to determine elastic modulus. These dependences were determined for three typical papers (uncoated, coated and photo paper) and for ink-jet, flexographic and laser prints made on these papers. Tensile stress dependencies on deformation are presented in figure S1.

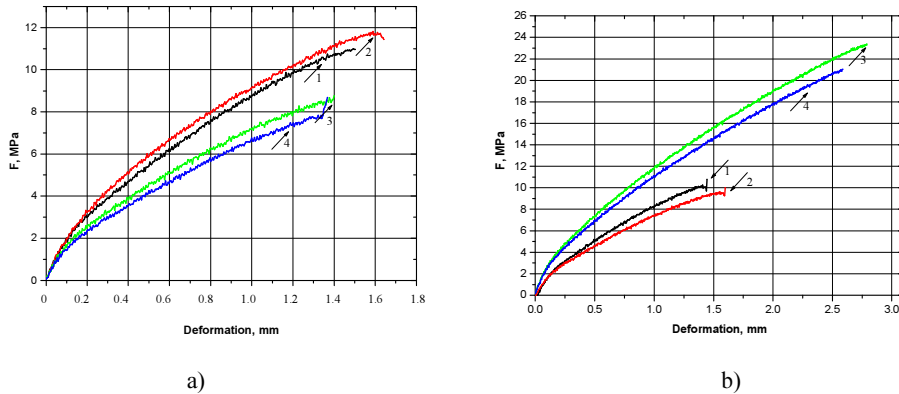


Fig. S1. Uncoated paper 4CC 100 g/m² (a) and coated paper Galerie art silk 150 g/m² (b) MD tensile stress dependence on deformation:
1 – paper, 2 – laser print K, 3 – inkjet print K, 4 – inkjet print CMYK.
Tension speed 5 mm/min (TAPPI)

Presented results show that despite ink (toner in laser print) layer on prints as compared with paper thickness (100–150 μm) is quite thin (ink-jet print 1–2 μm, laser 5–7

μm), are observed apparent changes of elastic properties. It can be expected that ink layer will increase paper strength. Measurement results suggest that this effect depends on the printing technology, paper grade and their interaction: print strength can be higher or lower as compared with paper.

The deformation of paper and prints is viscoelastic and there is no linear part in dependence of tensile stress on strain. Elasticity modulus was determined from the first part of tensile stress dependence on deformation. Elastic modulus of paper and prints depends on deformation speed. In all cases it increased with deformation speed, for example in the case of paper 4CC the increase of tensile speed from 1.0 to 5.0 mm/min. paper and prints elasticity modulus increases 1.5–2 times (S2 Fig.). Similarity of paper and prints modulus dependence on tensile speed suggests, that although ink notably changes tensile properties of prints, paper as a substrate plays a main role.

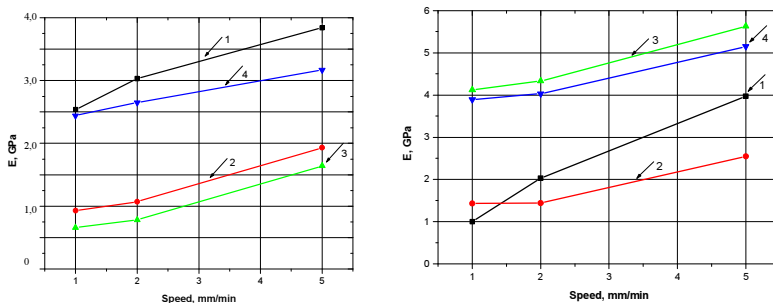


Fig. S2. Papers 4CC and *Galerie art silk* MD elasticity modulus dependence on the deformation speed: 1 – paper, 2 – ink-jet print K, 3 – laser print K, 4 – laser print CMYK

Tensile strength and folding resistance properties of paper and prints. Paper tensile strength is characterized mostly by breaking stress together with the tensile elongation at break. In standards (ISO 1924-1:1992(E), TAPPI, 2006) breaking stress is determined at a certain tension speed. TAPPI norm nominates 5 mm/min tension speed, ISO 1924 indicated tension speed 100 mm/min. Then it is reasonable to investigate tension properties using the same regime as paper is tested. Ink layer on paper changes paper tensile strength of prints, but these changes depend on the printing technology specifically on the used ink. As it was expected machine direction breaking stress of prints is higher than cross direction breaking stress but ink influence is not the same for both directions.

Breaking stress of ink-jet prints is almost the same as breaking stress corresponding paper. Although it is data scatter it was observed the breaking stress tendency to decrease (Fig. S3). This decrease was more prominent at lower tensile speed (Fig. S1), so it can be concluded that measuring at lower tension speed is more accurate and allows detect smaller changes. More obvious results were obtained for prints on photo paper *Lo-mond*: coverage with ink decreases breaking resistance, which is more prominent for cross direction. It should be noted that breaking stress measured at higher speed is se-

veral times higher than measured at lower speed. This correlates with elasticity modulus increase at higher tension speed.

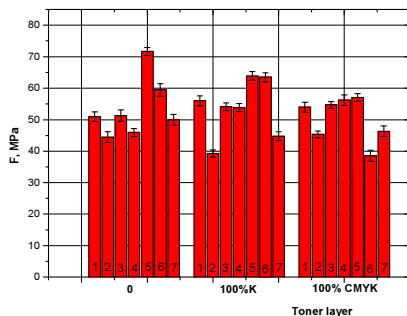


Fig. S3. Breaking stress (MD) of paper and ink-jet prints machine direction. Papers: 1 – *Maxi offset* 100 g/m², 2 – *4CC* 100 g/m², 3 – *Galerie art silk* 150 g/m², 4 – *Galerie art silk* 300 g/m², 5 – *Digigreen* 150 g/m², 6 – *Digigreen* 300 g/m², 7 – *Lomond* 130 g/m²

Flexographic prints behave conversely. In all cases (except coated paper *Galerie art silk* 150 g/m² with thin ink layer) breaking stress of prints is higher (up to 100 %) than corresponding paper breaking stress (Fig. S4).

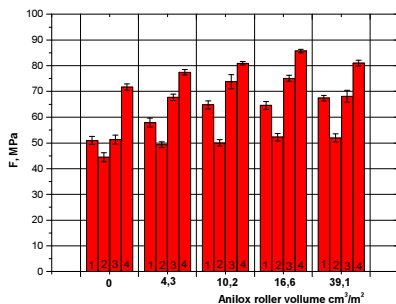


Fig. S4. Breaking stress (MD) of paper and flexographic prints. Papers: 1 – *Maxi offset* 100 g/m²; 2 – *4CC* 100 g/m²; 3 – *Galerie art silk* 150 g/m²; 4 – *Digigreen* 150 g/m²

Breaking stress of offset prints is almost the same as breaking strength of the corresponding paper. Breaking stress of laser prints is higher as breaking stress of the corresponding paper especially in cross direction. Differences of elastic properties and breaking stress of prints compared with corresponding paper were attributed to the different

ink interaction with paper and to the water impact. Folding resistance depends on the printing technology. Ink-jet and lithographic prints have lower and laser prints have higher than papers folding resistance. Flexographic prints folding resistance is higher for prints with thin ink layer and decreases with ink thickness.

Surface roughness of prints depends on printing technology. Ink-jet and flexographic prints have higher and offset and laser prints lower than papers surface roughness (Fig. S5).

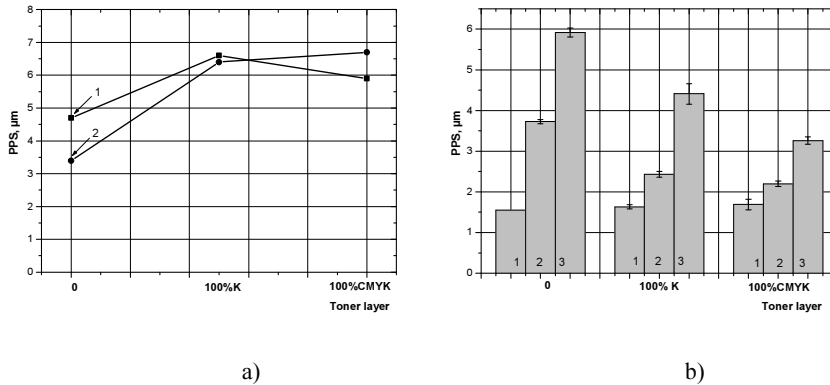


Fig. S5. Roughness of the inkjet prints (a, 1– *Maxi offset*, 2 – *4CC*) and laser prints (b, 1– *Lomond*, 2 – *4CC*, 3 – *Maxi offset*). *Parker Print-Surface* method

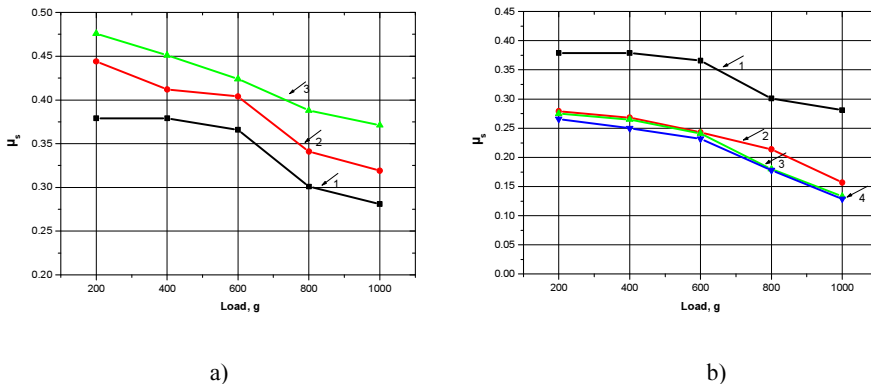


Fig. S6. Dependence of static friction coefficients paper-paper (1), paper – print (2) and print – print (3) on load: a – paper 4CC, ink-jet, b – paper 4CC, lithography

Friction properties of prints. Investigation of friction showed that friction of papers and prints is „stick-slip“ type and coefficients of friction decrease increasing the load. This means that adhesion determines the paper and prints friction. Static and kinetic friction coefficients of ink-jet, flexographic and laser prints are higher than paper both friction coefficients. Contrary friction coefficients of lithographic prints are lower than paper friction coefficients (Fig. S6). Friction of prints on coated papers is higher than friction of prints on uncoated papers, despite that the last are rougher.

Colour properties. Colour of prints depends not only on paper colour but also on ink and paper interaction and formed ink coating morphology (Fig. S7).

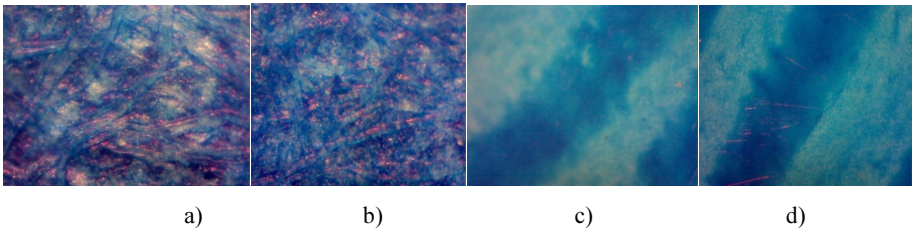
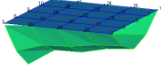
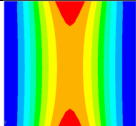
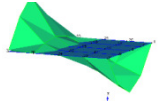
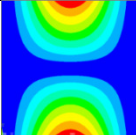


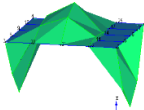
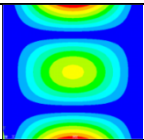
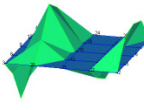
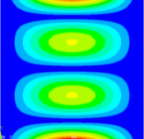
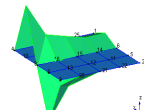
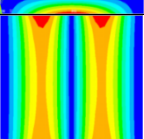
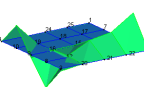
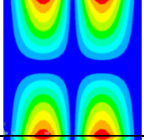
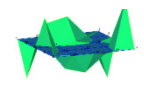
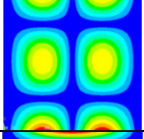
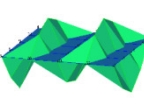
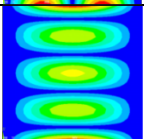
Fig. S7. Surface photos of flexographic prints. Papers: a) – *Maxi offset*, b) – *4CC*, c) – *Galerie art silk*, d) – *Digigreen*. Magnitude 40^x

Identification of prints mechanical characteristics. Elasticity parameters of paper and prints as composite materials were identified using technology consisting from vibrational tests and numerical modelling of investigated material. In Table S1 are presented the results for paper *Maxi offset 80 g/m²* with laser toner and varnish layer.

Table S1. Eigenfrequencies in Hz of paper *Maxi offset 80 g/m²* with toner and varnish layers

Mode	Frequency experimental, f^{NE}	Mode shape, experimental	Frequency calculated, f^{BEM}	Mode shape calculated	Experimental and calculated frequency difference, %
1	8		7.1		+11.30
2	11		10.7		+2.80

Continue of Table S1

Mode	Frequency experi- mental, f^{NE}	Mode shape, experimerimental	Frequency calculated, f^{BEM}	Mode shape cal- culated	Experi- mental and calcu- lated fre- quency difference, %
3	13		12.8		+1.56
4	18		18.8		-4.26
5	26		28.9		-10.03
6	31		30.1		+3.0
7	42		43.8		-4.11
8	44		46.4		-5.17

Vibrational tests were made to determine natural frequencies and mode shapes. Elasticity parameters were numerically in mathematical model until natural frequencies coincide with obtained in vibrational experiment (inverse engineering problem). It was obtained good matching of experimental and calculated eigenfrequencies and mode shapes. Identified values of elasticity modulus are: elasticity modulus 1.43 GPa for machine direction (MD) and 1.48 GPa for cross direction. The MD value of elasticity modulus is close to directly determined laser print modulus value on paper 4CC at tensile speed from 1 to 5 mm/min, where it varies from 0.95 GPa to 1.95 GPa. These results show that proposed FE method together with the vibrational testing allows identifying paper and prints elasticity modulus with good accuracy.

General conclusions

1. Prints can be considered as composite materials formed from several compounds. Review of publications shows that prints as composite materials made using different printing technologies are almost not investigated. The properties of the end products especially packages depend on the prints properties and it is reasonable to perform comprehensive investigation of their properties.

2. The determination of the properties of prints made using different printing technologies and different paper grades as composite materials requires comprehensive examination of the mechanical, tensile and folding resistance, friction and colour properties. It is reasonable to use paper industry standard methods enlarging them in some cases.

3. The numerical print modelling using finite element methods (FEM), genetic algorithms together with experimental vibration methods and solving inverse engineering problem enables to determine the print's elastic modulus.

4. There were determined following features of prints:

- elastic properties and tensile resistance of prints depend on the deformation velocity: when deformation velocity was increased from 0.5 to 5 mm/min the elastic modulus increased 2 times and accordingly increased the tensile resistance; this is explained by the viscoelastic deformation features,

- the static and kinetic friction coefficients of flexographic, ink-jet and laser prints depend on the load and are higher as compared with paper; friction between lithographic prints is lower as paper's friction; observed changes are explained by the dominant role of adhesion forces,

- the changes of prints' surface roughness as compared with the papers roughness depend on the printing technology – flexographic and ink-jet inks increase the roughness up to 2 times while lithographic and laser printing inks decrease it,

- the colour of prints depends not only on the papers colour but also on the morphology of the ink layer surface.

5. The elastic properties of paper and prints with two layers on it were determined modelling prints using modified FEM method; the modelling results match correspond to the experimentally measured elastic modulus.

6. The investigation of the mechanical, resistance, friction and colour properties of the flexographic, ink-jet, laser and lithographic prints on different paper grades showed that prints are complex composite material with characteristic mostly dependent on ink and paper surface interactions. Complex investigation of prints revealed the features of the changes of print properties as compared with paper properties. Obtained results enabled to make assumptions about the causes (mechanisms) of the observed changes of the properties.

Priedai²

A priedas. Popieriaus rūšys ir jų specifikacijos

B priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje

C priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos

² Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje

Simona GRIGALIŪNIENĖ

SPAUDINIŲ ANT POPIERIAUS KAIP KOMPOZICINIŲ MEDŽIAGŲ
SAVYBIŲ TYRIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
medžiagų inžinerija (08T)

INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF PAPER PRINTS
AS COMPOSITE MATERIALS

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Material Engineering (08T)

2015 10 26. 11,5 sp. l. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino S.Jokužio leidykla-spaustuvė